

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio de materiales de fabricación aditiva para impresión 3D de micro- recolectores de energía

Autor: Ana María Sánchez González

Tutor: Antonio Romero Ordóñez

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio de materiales de fabricación aditiva para impresión 3D de microrrecolectores de energía

Autor:

Ana María Sánchez González

Tutor:

Antonio Romero Ordóñez

Profesor Titular de Universidad

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Grado: Estudio de materiales de fabricación aditiva para impresión
3D de microrrecolectores de energía

Autor: Ana María Sánchez González
Tutor: Antonio Romero Ordóñez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Cuando comencé esta experiencia en la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla, me sentí muy afortunada, pero no alcanzaba a imaginar el antes y después que marcaría en mi persona.

He aprendido más de lo nunca soñé de la mano de profesores maravillosos, a ellos, tengo que agradecerles el fruto de este humilde trabajo. En especial, le agradezco a mi tutor, Antonio Romero Ordóñez, que me haya dado la oportunidad de profundizar en esta interesante materia de la que espero seguir aprendiendo a lo largo de mi carrera.

A mis compañeros del 96, que han sido en esta carrera, amigos y familia, entre todos hemos conseguido alejarnos del punto de partida. A Alejandro, Mario, Elena, Alicia, Rocío, Ignacio y Gonzalo. Por no dejarme rendirme nunca. Soy afortunada por haberos conocido, me habéis cambiado.

Agradecida a ARUS Andalucía Racing Team, una oportunidad única que me hizo descubrir mi vocación. A Víctor, Samuel, Alejandro y Julien, compañeros de meta y risas en turnos más largos que el día.

Por último, he de agradecerse especialmente a mi familia y su infinita paciencia. Su apoyo incondicional ha sido y será siempre una constante en mi vida. Gracias por animarme y levantarme cuando más lo necesitaba.

*Ana María Sánchez González
Grado en Ingeniería Aeroespacial, Escuela Superior de Ingeniería*

Sevilla, 2020

Resumen

En este texto pretende estudiarse la posibilidad de sustituir los materiales tradicionalmente empleados por productos desarrollados mediante fabricación aditiva, para una aplicación concreta: la fabricación de soportes para microrrecolectores de energía.

Trás una breve introducción y revisión bibliográfica acerca de la fabricación aditiva se elegirá un procedimiento y material adecuado para el problema que nos ocupa. Posteriormente, se intentará optimizar el comportamiento de la estructura de soporte.

A lo largo de este texto se empleará una metodología experimental de ensayo: "El método de Taguchi", con el objetivo de reducir los costes y tiempo del ensayo. Se analizarán los resultados obtenidos de los 3 tipos de ensayos modelados en ANSYS: ensayo a tracción, ensayo de flexión a tres puntos y análisis modal, y se extraerán conclusiones.

Este trabajo se ha realizado en circunstancias excepcionales, derivadas de la crisis originada por la pandemia global del COVID-19, las cuales han modificado el alcance y los objetivos iniciales. Inicialmente se planteó la realización de varios ensayos en laboratorio, de los cuales se podrían extraer algunas de las propiedades necesarias para la caracterización de las piezas fabricadas mediante impresión 3D; sin embargo, debido a las medidas extraordinarias tomadas a nivel nacional, resultó imposible acceder al laboratorio de la universidad y se optó por un enfoque más teórico: la optimización de los parámetros de impresión mediante análisis numérico, dejando como posible desarrollo futuro la realización de dichos ensayos.

Abstract

In this document, the possibility of replacing the brass mounting structure with another one made by means of Additive Manufacturing techniques (AM) is studied. This mounting structure supports a piezoelectrical device which allows energy harvesting.

After a brief introduction about AM, the most suitable material will be chosen. Moreover the optimization of the structure will be addressed.

In order to reduce costs and time, Taguchi's Method, an experimental test method, is introduced. Finally, tensile, flexural and modal test results will be analyzed and conclusions will be drawn.

This final degree project was developed during the COVID-19 global pandemic, under such exceptional circumstances, this research original scope and object were modified. Initially, it was planned to perform tests in order to produce reliable and precise data about the mechanical behaviour of 3D printing structures. However, due to the extraordinary measures taken under the national state of emergency, it was impossible to work in the university laboratories. For this reason, a more theoretical approach was selected: print parameters optimisation by means of numerical analysis. Trials are left as future developments related to this project.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Acrónimos</i>	XI
1 Introducción y marco del trabajo.	1
1.1 Breve reseña histórica sobre la recolección de energía.	1
1.2 Objetivo y alcance del trabajo.	3
1.3 Estructura del documento.	4
2 Introducción al "Additive manufacturing"	5
2.1 Las 7 principales categorías de "Additive Manufacturing" y sus materiales.	6
2.1.1 Métodos de fabricación basados en la extrusión (ME).	8
2.1.2 Material Jetting (MJ).	8
2.1.3 Binder Jetting (BJ).	9
2.1.4 Sheet Lamination Processes (SLP).	10
2.1.5 Photo-polymerization (VP).	10
2.1.6 Powder Bed Fusion (PBF).	11
2.1.7 Directed Energy Deposition (DED).	12
2.2 Discusión sobre la elección del método de fabricación	12
3 Parámetros que afectan al proceso.	15
3.1 Influencia del material.	15
3.2 Influencia de los parámetros de impresión.	18
3.3 Observaciones generales acerca de las combinaciones de materiales y parámetros de impresión	22
3.3.1 Comportamiento a tracción y compresión.	22
3.3.2 Comportamiento a flexión.	24
3.3.3 Comportamiento a fatiga.	25
3.4 Elección del material. Discusión de la decisión.	26
4 Implementación del método de Taguchi. Método de ensayo experimental.	31
4.1 Revisión del "Método de Taguchi"	32

4.1.1	Los pasos del "Método Taguchi"	32
	Determinación de las variables principales y sus efectos colaterales.	32
	Determinación de los factores "ruido" y las "características de calidad".	33
	Identificación de la función objetivo.	34
	Elección de los factores de control y sus niveles. Elección de la Formación Ortogonal de Taguchi.	34
	Construcción de la matriz de Taguchi.	35
	Análisis de resultados y predicción del óptimo.	36
	Validación y verificación de los resultados.	38
5	Revisión de la normativa de ensayos.	39
5.1	Normativa aplicable al ensayo a tracción. Revisión de la norma "ASTM. D638-14".	39
5.1.1	Maquinaria de ensayos	40
5.1.2	Extensómetro	41
5.1.3	Micrómetros	41
5.1.4	Láminas, placas y moldeados de plástico.	42
5.1.5	Superficies del espécimen.	42
5.1.6	Marcas de medida.	42
5.1.7	Posible anisotropía.	42
5.1.8	Número de ensayos a cada espécimen.	43
5.1.9	Velocidad de ensayo.	43
5.1.10	Condicionamiento.	44
5.1.11	Procedimiento.	45
5.2	Normativa aplicable al ensayo a flexión. Revisión de la norma "EN ISO 178:2003".	45
5.2.1	Maquinaria de ensayos	45
5.2.2	Equipo indicador de fuerza y deflexión.	46
5.2.3	Especimen.	46
5.2.4	Inspección del espécimen.	46
5.2.5	Posible anisotropía.	47
5.2.6	Número de ensayos a cada espécimen.	47
5.2.7	Velocidad de ensayo.	47
5.2.8	Condicionamiento.	47
5.2.9	Procedimiento.	47
5.3	Normativa aplicable al ensayo modal.	50
5.3.1	Especimen.	50
5.3.2	Procedimiento y maquinaria de ensayo.	50
5.3.3	Condicionamiento.	51
5.3.4	Adaptación del ensayo.	51
6	Caso de estudio	55
6.1	Configuración de la impresión.	55

6.2	Observaciones sobre el análisis estructural.	57
6.3	Observaciones sobre la geometría	58
6.4	Análisis a tracción.	59
6.4.1	Geometría	59
6.4.2	Resultados del análisis.	61
6.4.3	Análisis de los resultados presentados.	65
6.5	Análisis a flexión a 3 puntos.	69
6.5.1	Geometría.	69
6.5.2	Resultados del análisis.	71
6.5.3	Análisis de los resultados presentados.	76
6.6	Análisis modal.	80
6.6.1	Geometría.	80
6.6.2	Resultados del análisis.	85
6.6.3	Análisis de los resultados presentados.	91
7	Conclusiones	95
7.1	Conclusiones generales.	95
7.2	Conclusión final y desarrollos futuros.	96
	<i>Índice de Figuras</i>	101
	<i>Bibliografía</i>	107

Acrónimos

<i>AM</i>	"Additive Manufacturing". Fabricación aditiva.
<i>MJ</i>	"Material Jetting". También conocida como "Multi-jet".
<i>BJ</i>	"Binder Jetting".
<i>ME</i>	"Material extrusion based systems". Sistemas de fabricación aditiva basados en la extrusión.
<i>SLP</i>	"Sheet Lamination Processes", en ciertos textos aparece también abreviado como "SL" simplemente.
<i>PBF</i>	"Powder Bed Fusion".
<i>VP</i>	"Vat Photo-polymerization".
<i>DOE</i>	"Design of experiments". Diseño de experimentos.
<i>DED</i>	"Directed Energy Deposition" o "Metal Deposition". Comúnmente conocida como "Tecnología de Deposición de Metales"
<i>FDM</i>	"Fused deposition modelling". Métodos de fabricación aditiva basados en la deposición del filamento "fundido", es un subgrupo del ME. También suele nombrarse como FFF.
<i>FFF</i>	"Fused Filament Fabrication". Fabricación con filamento fundido, método basado en la extrusión (ME) de uso extendido en la industria. También suele nombrarse como FDM.
<i>REJ</i>	"Rejilla". Abreviatura de "Rejilla" que hace referencia al empleo de un patrón interno del espécimen en cuestión, que presenta intersticios cuadrados.
<i>HEX</i>	"Hexagonal". Abreviatura de "Hexagonal" que hace referencia al empleo de un patrón interno del espécimen en cuestión, que presenta intersticios con forma de hexágono regular.
<i>TRIA</i>	"Triangular". Abreviatura de "Triangular" que hace referencia al empleo de un patrón interno del espécimen en cuestión, que presenta intersticios con forma de triángulo equilátero.

1 Introducción y marco del trabajo.

Incluso se puede pensar que el radio podría llegar a ser muy peligroso en manos de criminales, y aquí la cuestión puede plantearse en los beneficios para la humanidad de conocer los secretos de la Naturaleza, si ya está lista para sacar provecho de ella, o si este conocimiento no será perjudicial para ella. El ejemplo de los descubrimientos de Nobel es característico, como esos poderosos explosivos que han permitido al hombre hacer un trabajo maravilloso. Son también un medio terrible de destrucción en manos de los grandes criminales que llevan a los pueblos hacia la guerra. Yo soy uno de los que creen con Nobel que de los nuevos descubrimientos se deriva más bien que mal para la humanidad.

PIERRE CURIE, 1859-1906

En este texto pretende estudiarse la posibilidad de sustituir los materiales tradicionalmente empleados por productos desarrollados mediante fabricación aditiva, para una aplicación concreta: la fabricación de soportes para microrrecolectores de energía.

1.1 Breve reseña histórica sobre la recolección de energía.

En un momento histórico como el actual, en el que el Pacto Verde Europeo promete una transición ecológica sostenible hacia un continente climáticamente neutro en 2050 [6]; el desarrollo de fuentes alternativas de energía, que sustituyan a las contaminantes energías "no renovables" atrae gran interés científico. En este contexto la microrrecolección de energía se coloca en el punto de mira como posible solución.

Sin embargo, lejos de ser un concepto actual, el origen de esta tecnología se remonta hasta 1826 con el descubrimiento del "efecto Seebeck": la inducción de corriente mediante 2 metales diferentes a distinta temperatura; por Thomas Johann Seebeck, de quién toma su nombre. Continuando con esta evolución, en 1831, Michael Faraday documenta la generación de electricidad a partir del electromagnetismo, en concreto, establece que un

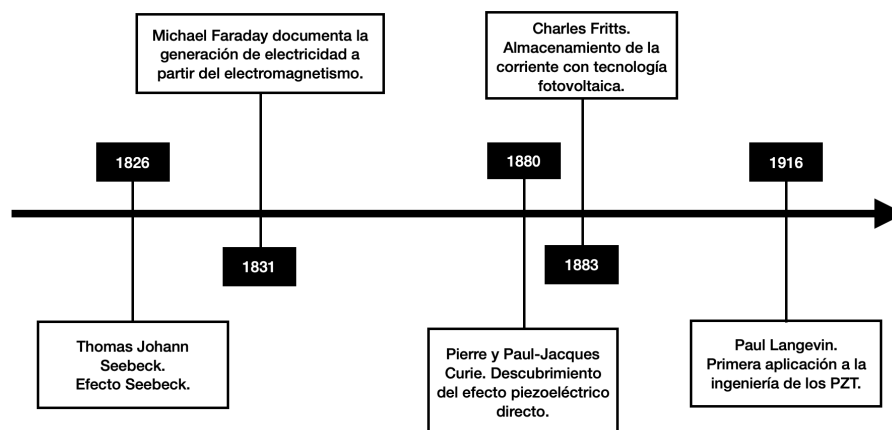


Figura 1.1 Breve cronología del desarrollo de la recolección de energía.

campo magnético variable genera un campo eléctrico. A esta relación se la denomina Ley de Faraday y constituye un hito fundamental en la historia de la ciencia.

No obstante ha de esperarse hasta 1880 para que el concepto de piezoelectricidad tome forma de mano de Pierre y Jacques Curie. Los hermanos, que experimentaron con cristales (cuarzo, topacio, turmalina, azúcar de caña y sal de Rochelle) sometidos a tensión mecánica, registraron mediciones de la carga eléctrica superficial de éstos, y constataron la existencia de una correspondencia entre los efectos eléctricos y el cambio de temperatura y la tensión mecánica. Denominaron al fenómeno descubierto "piezoelectricidad". No fue hasta un año después, en 1881, que Lippman probó que, no sólo cuando se aplica una tensión mecánica al material se produce una carga eléctrica (piezoelectricidad directa); sino que, también un campo eléctrico crea una tensión mecánica: piezoelectricidad inversa.

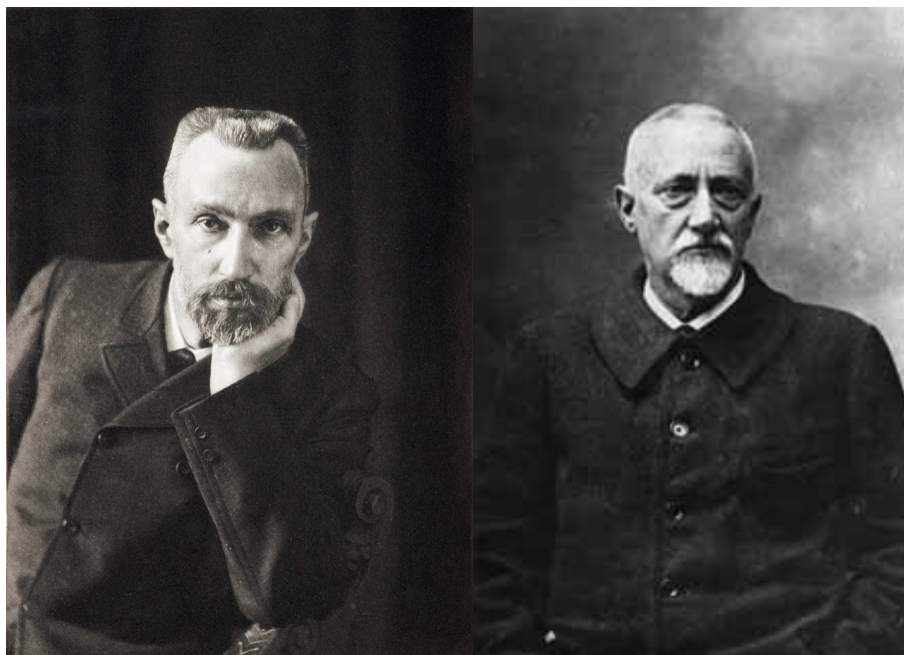


Figura 1.2 Pierre (a la izquierda) y Paul-Jacques Curie (derecha), descubridores del efecto piezoeléctrico directo.

Por su parte, el primer ejemplo como tal de recolección de energía usando tecnología fotovoltaica se da en 1883, con Charles Fritts que constató que “la corriente, si no se requería de inmediato, podía almacenarse en acumuladores y después ser usada”.

Aunque a comienzos del siglo XX la piezoelectricidad había alcanzado cierta fama en la comunidad científica, no se conocían aplicaciones directas para esta tecnología. Es en 1916, durante la Primera Guerra Mundial, cuando Paul Langevin, desarrolla un detector submarino ultrasónico que implementa la piezoelectricidad: el denominado "transductor de tipo Langevin"; que posteriormente dio lugar a los dispositivos de sonar que se utilizan ampliamente hoy en día.

En 1940 con el apogeo de la cerámica de titanato de bario, que se populariza por su bajo coste y gran facilidad de fabricación y que, tras un proceso de polarización eléctrica se convierte en un material piezoeléctrico, esta tecnología alcanza una mayor relevancia [30].

A día de hoy, siguen investigandose las ventajas de la piezoelectricidad.

La recolección de energía tiene como objetivo la colecta de energía del ambiente con el fin de ayudar o asistir a los sistemas de potencia, posiblemente mediante el almacenaje (en baterías, condensadores...) de la energía cuando ésta no se requiere. Tales técnicas pueden reducir de manera significativa las cantidades de energía requeridas por la aplicación en cuestión, o incluso simplificar la tarea.

Existen, en la actualidad, muchos tipos de transductores que ofrecen diferentes utilidades. En concreto, son populares aquellos capaces de convertir la energía de un objeto en vibración en energía eléctrica. Este es el caso de los usados para recolectar energía de escaleras, suelos, puentes y estructuras de paso, etc.

La recolección de energía se aplica mayoritariamente en ámbitos donde la cantidad de energía demandada de forma continua, es relativamente pequeña; o bien, en ámbitos donde la demanda de energía es elevada pero concentrada en cortos periodos de tiempo. En ambos casos, lo usual es que el recolector haya, previamente, recolectado y almacenado la cantidad de energía necesaria y la suministre cuando el sistema lo requiera [46].

1.2 Objetivo y alcance del trabajo.

Como ya se ha indicado, en este texto pretende analizarse la viabilidad de fabricar la estructura soporte de un microrrecolector de energía con materiales de impresión 3D. La aplicación concreta de dicho sistema será la recolección de la energía de un puente sometido a la vibración estructural debido al paso de vehículos o ferrocarriles.

En los siguientes capítulos analizaremos en detalle los procesos y parámetros de la Fabricación Aditiva o "Additive Manufacturing", y cómo afectan a la pieza final. Sin embargo, quería realizarse primero una breve introducción a la recolección de energía para contextualizar los objetivos de este estudio, pues como se indica en [31]: "La cantidad de energía disponible para su recolección, es obviamente dependiente de la frecuencia y amplitud de la vibración de la plataforma, así como del tamaño y masa de la fuente de energía".

El deseo de sustituir el latón, tradicionalmente empleado para esta aplicación, por materiales de impresión 3D, encuentra su motivo en la facilidad y rapidez de impresión, en la libertad de diseño que nos permite esta técnica y en su bajo coste. Si junto a todo ello, se contempla la posibilidad de disponer de una impresora 3D, se tienen unas condiciones de autonomía y comodidad en el diseño, que facilitarán la obtención de una estructura óptima.

A lo largo de este texto se elegirán el método y material más adecuados para la fabricación del soporte. Tras su determinación, se analizará, con 3 tipos diferentes de ensayo, la pieza obtenida con ellos. Se realizarán en primer lugar, un análisis a tracción del espécimen, en segundo lugar un análisis a flexión y, finalmente, un análisis modal. De los dos primeros ensayos se estimarán el módulo elástico y el módulo de flexión. Para el análisis modal se analizará una estructura similar a una viga en voladizo (o más bien una "placa", pues tiene 2 dimensiones considerablemente mayores que la tercera), con masa puntual en su extremo libre. Dicho modelo es frecuentemente empleado en la recolección de energía y es analizado en el libro de referencia, "Energy Harvesting Technologies" [28].

En estos análisis se evaluará la influencia de diferentes parámetros de impresión en los resultados obtenidos.

Dada la situación excepcional derivada de la crisis sanitaria COVID-19, el alcance de los análisis es puramente numérico.

1.3 Estructura del documento.

Este texto se divide en 7 capítulos a lo largo de los cuales se hará una inmersión en la tecnología del Additive Manufacturing y tratará de hallarse la configuración de impresión óptima para la aplicación en cuestión. En el siguiente capítulo, el segundo, se comenzará presentando la tecnología, así como los diferentes métodos que engloba. Posteriormente se hará la elección del método y tecnología a usar en base a razones económicas y técnicas. Será en el tercer capítulo donde se trate la interacción entre materiales e impresora, que tanto dificulta este proceso. También se presentarán algunos filamentos y se elegirá el más conveniente para la fabricación de la estructura de soporte. En el cuarto capítulo se hará una introducción a la metodología de ensayo experimental, el método de Taguchi, que permite reducir el número de experimentos necesarios y analizar los resultados desde el punto de vista de eficiencia del sistema. Completaremos la determinación del proceso de experimentación con la revisión de las normativas correspondientes en el capítulo quinto. En el capítulo sexto se expondrán en detalle los análisis realizados en ANSYS y se mostrarán los resultados obtenidos, que posteriormente, se comentarán en el séptimo y último capítulo.

2 Introducción al "Additive manufacturing"

Additive manufacturing is the formalized term for what used to be called rapid prototyping and what is popularly called 3D Printing. In other words, the emphasis is on creating something quickly and that the output is a prototype or basis model from which further models and eventually the final product will be derived. In a product development context, the term rapid prototyping was used widely to describe technologies which created physical prototypes directly from digital model data.

IAN GIBSON, DAVID ROSEN, BRENT STUCKER, 2015

La norma ISO/ASTM 52900:2015 [41] denomina “Additive Manufacturing” al conjunto de procesos de fabricación que, basándose en una representación geométrica genera dicha geometría físicamente a partir de la superposición de capas de material. Estos procesos se conocen también más comúnmente, como “de rápido prototipado” o “free-form fabrication” haciendo alusión a la no necesidad de moldes.

Este tipo de técnicas tiene como principales ventajas la libertad en el diseño, el ligero peso de los productos obtenidos (en general), su rapidez, la eficiencia en el empleo del material y, la cada vez, mayor variedad de materiales disponibles. Entre estos últimos destacan los polímeros y los “polymer-based composites” (materiales compuestos en los que uno de los componentes es un polímero, usualmente la matriz). Inicialmente sus aplicaciones no requerían un alto nivel de funcionalidad, estando confinados mayormente al prototipado e industrias en la que el comportamiento mecánico no era prioritario. Con la reciente ampliación de su sector de ocupación, la búsqueda de nuevos materiales se ha intensificado.

2.1 Las 7 principales categorías de “Additive Manufacturing” y sus materiales.

Las diferentes técnicas suelen agruparse en las 7 metodologías que se muestran en la tabla 2.2 y un breve esquema de su funcionamiento puede encontrarse en la figura 2.1.

La variedad de materiales aptos para cada método se sitúa como la ventaja más destacable, colocando en una posición preferente de cara a la innovación a: ME (material extrusion based systems), BJ (binder jetting), PBF (powder bed fusion), y MJ (material jetting). De los cuales solo ME y MJ, pueden procesar materiales de base biológica. En comparación MJ proporciona una mejor resolución, a cambio de una reducción en la viscosidad del material (lo que acota éste a fotopolímeros y resinas termoestables), mientras que ME ofrece un mayor rango de viscosidad con un coste en la resolución del producto y un aumento de las temperaturas de trabajo.

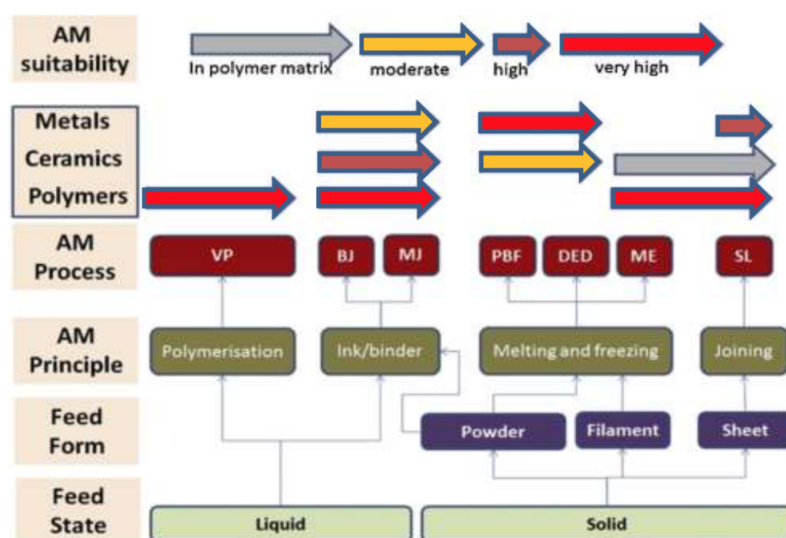


Figura 2.1 Comparativa general de procesos de AM [4].

El gran potencial de esta tecnología se ve, sin embargo, frenado por la carencia de guías previas para la fabricación y el diseño. Este reto para su desarrollo cobra especial relevancia en industrias donde se necesita alcanzar unos determinados criterios de “calidad”, para lo cual lo óptimo sería partir de unos principios estandarizados de diseño. Una particularización de lo anterior es la fabricación de piezas a las que se les exige un buen comportamiento mecánico. Es destacable la marcada anisotropía de las piezas desarrolladas mediante fabricación aditiva, así como la complejidad de su comportamiento. Precisamente en este hecho reside el problema que vamos a abordar a lo largo de este informe.

Proceso	Definición	Tecnología	Material	Mínimo espesor capa [μm]	Aplicaciones y máximo tamaño fabricable [mm^3]
Sistemas basados en la extrusión	Técnica de Additive Manufacturing (AM) en la que el material se calienta y deposita selectivamente con ayuda de una tobera para formar una pieza tridimensional.	Escritura directa de tinta (DIW), Modelado mediante deposición fundida(FDM), Fabricación con filamento fundido (FFF)	Termoplásticos (PLA, ABS, HIPS, Nylon, PC)	10-100	1500X1100X1500 Repuestos, piezas automóvil, prototipos y plantillas
Material Jetting	Técnica del AM en la que se depositan selectivamente un fotopolímero y un catalizador formando finas capas que se apilarán y formarán una geometría 3D. Dicha geometría requiere un posterior curado.	Modelado Multi-jet (permite la impresión con múltiples materiales), Drop on Demand, Thermo-jet printing; e Inkjet printing.	Polímeros, plásticos y ceras.	13	300X185X200 Patrones de fundición, prototipos y piezas de electrónica.
Binder Jetting	Técnica del AM que se basa en la aglutinación de polvo de un determinado material, con la ayuda de un catalizador o agente aglutinante selectivamente depositado con el objetivo de formar una geometría 3D.	3D printing	Polímeros, ceras, metales y arenas de fundición.	90	2200X1200X600 Prototipos, patrones de fundición y moldes.
Procesos de laminación	Técnica del AM en la que se apilan y adhieren láminas de material para formar geometrías 3D.	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Películas de metal, papel y plástico.	100	256X169X150 Prototipos, piezas de plástico y UP.
Fotopolimerización	Técnica del AM en la que un fotopolímero líquido se introduce en un depósito móvil y es selectivamente curado activando su polimerización con luz ultravioleta.	Stereolithography (SLA) Digital Light Processing (DLP) Continuous Liquid Interface Production (CLIP) Scan, Spin and Selectively Photocure (3SP)	Fotopolímeros.	50-100 25-150 50-100 25-100	1500X750X550 192X120X230 190X112X325 266X175X193 Prototipo rápido, herramientas y patrones de colada.
Powder Bed Fusion	Técnica del AM que usa energía térmica para fundir regiones seleccionadas del material pulverizado.	Selective laser sintering (SLS) Electron Beam Melting (EBM) Selective laser melting (SLM) Selective heat sintering (SHS) Direct metal laser sintering (DMLS)	Polvo de polímeros, metales y materiales cerámicos.	80 70 20-50 100 20-40	381X330X460 6096X1194X1524 300X300X300 160X140X150 250X250X325 Prototipo rápido en la industria aeronáutica, automovilística, y dental, así como en joyería.
Deposición directa de energía	Técnica del AM que emplea un haz de energía térmica concentrada (p.ej: láser o tecnología plasma) para fusionar materiales metálicos o híbridos mediante un proceso selectivo de fundición y deposición.	Laser Engineering Net Shape (LENS)	Metales	50 -100	1500X1500X2100 Industria aeronáutica, militar, así como reparaciones de objetos metálicos y satélites.

Figura 2.2 Comparativa general de procesos de AM [4][27].

2.1.1 Métodos de fabricación basados en la extrusión (ME).

Este tipo de técnica generalmente engloba procesos en los que la materia prima (la pre-forma del filamento) es forzada a pasar por un cabezal de impresión. Es en éste, donde el material es calentado, y extruído ya en forma de filamento, que se deposita con un determinado patrón (gobernado por los movimientos del cabezal) formando una capa bidimensional. La sucesiva repetición de capas da lugar a la geometría tridimensional. Esta metodología suele emplearse para el prototipado rápido de piezas relativamente poco voluminosas en plástico. Dentro de este conjunto de métodos, el de uso más extendido es el conocido como FDM, "Fused Deposition Modelling", que, a veces, recibe también el nombre de FFF "Fused Filament Fabrication", haciendo referencia a la forma de la materia prima empleada.

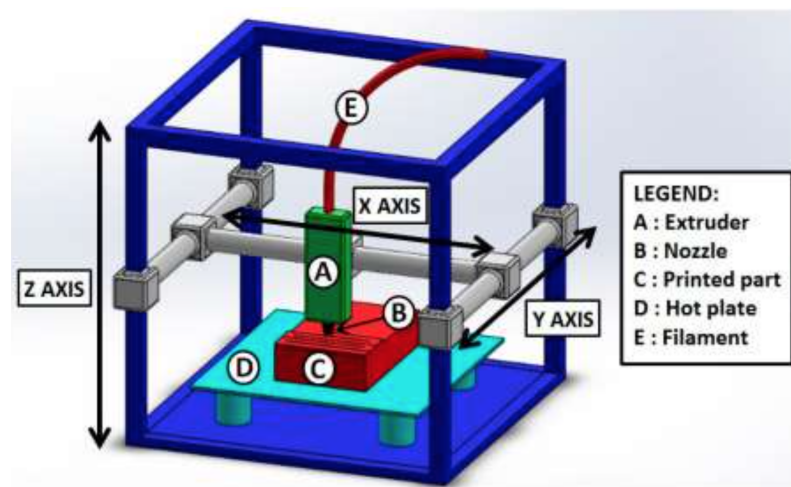


Figura 2.3 Modelo típico de máquina de FDM [4].

En la imagen 2.3, se muestra una máquina típica empleada para FDM (fused deposition modelling).

2.1.2 Material Jetting (MJ).

Esta técnica, basada en la tradicional impresión de tinta, dispone de varios cabezales de impresión que la dotan de capacidad para alternar y combinar diferentes materiales, su principal ventaja. Por esta característica es también nombrada con frecuencia como "Multijet".

El resto del proceso conlleva una metodología similar a los anteriormente mencionados "métodos extrusivos", es decir que se basa también, en el apilamiento de capas de material hasta la obtención de la geometría 3D pertinente. No obstante la técnica de Material Jetting introduce una notable diferencia: una vez depositada cada una de las capas, el cabezal de impresión realiza un nuevo barrido sobre éstas, emitiendo luz ultravioleta de modo que el material se cure mediante fotopolimerización. En este aspecto, hay una destacable similitud con SLP (sheet lamination processes), técnica de la que se hablará a continuación.

La introducción de la técnica de fotopolimerización (basada en monómeros de epoxy) dota al material de una ventajosa homogeneidad térmica y mecánica. Por contra, las piezas fabricadas mediante este proceso, poseen una limitada elongación a la rotura y

fotosensibilidad, por lo que sus propiedades mecánicas se degradan con el tiempo [44], [20]. Véase la figura 2.4.

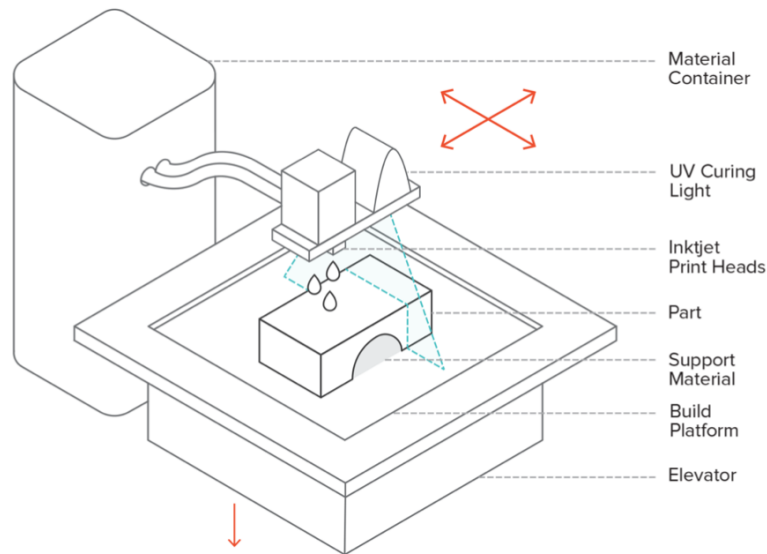


Figura 2.4 Modelo típico de máquina de MJ [44].

2.1.3 Binder Jetting (BJ).

Esta metodología fue principalmente desarrollada en el Instituto Tecnológico de Massachusetts a principios de la década de 1990. Su proceso consiste en añadir un aglutinante a un depósito lleno del material de trabajo en formato molecular que al contacto se rigidiza, constituyendo una sección transversal de la pieza. Actualmente son compatibles con este proceso una amplia gama de materiales (polímeros, cerámicos, metales...)[17].

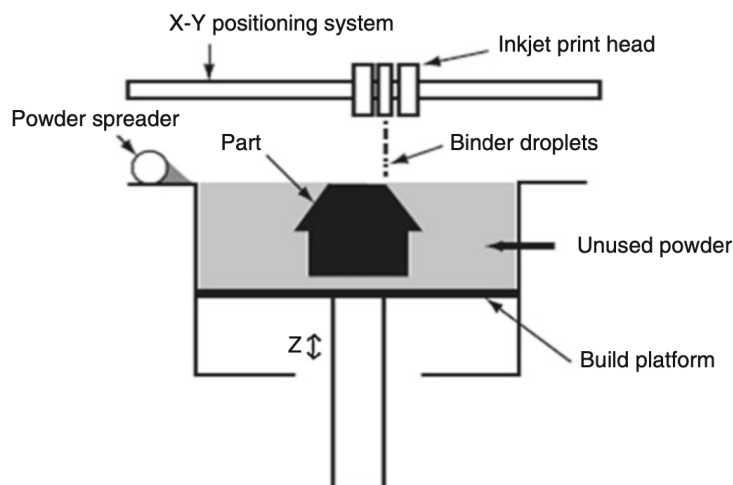


Figura 2.5 Modelo típico de máquina de BJ [18].

2.1.4 Sheet Lamination Processes (SLP).

En 1991 surgió una de las primeras técnicas de AM, recibió el nombre de "Laminated Object Manufacturing" ó LOM. Como su nombre indica el proceso conllevaba la laminación capa a capa de hojas de material cortadas mediante un láser CO_2 de modo que su perímetro sea el de la sección transversal de la pieza. A partir de esta primera técnica se han desarrollado otras que modificaban los procesos de corte y ampliaban la gama de materiales disponibles. Por la metodología de construcción solo pueden cortarse los contornos exteriores de la pieza, además según el momento del proceso en que se realicen estos cortes se diferencian 2 estrategias:

- Primero se apilan las capas y posteriormente se realiza el corte.
- Primero se realiza el corte y luego se apilan las capas.

Por otro lado, según el tipo de proceso seguido para conseguir el correcto apilamiento y cohesión de las capas se pueden diferenciar: procesos que añaden adhesivos, procesos de pegado mediante temperatura, empleo de grapas y otros elementos de sujeción y finalmente procesos de soldado ultrasónico [24]. Véase el esquema de una de las posibles máquinas en la figura 2.6.

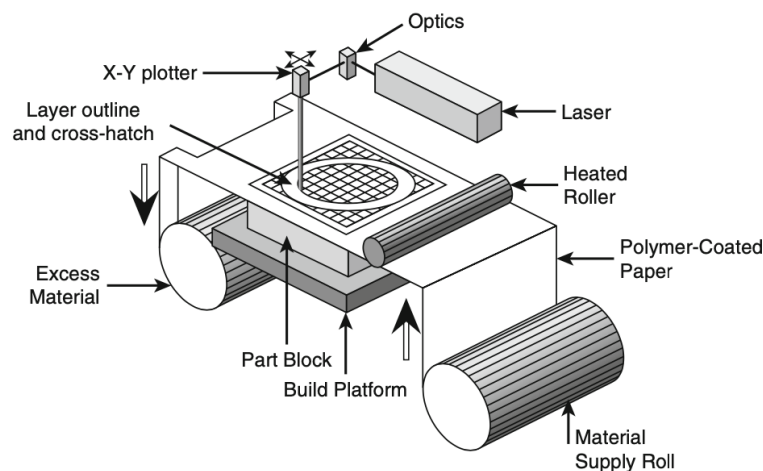


Figura 2.6 Modelo típico de máquina de procesos de SLP [24].

2.1.5 Photo-polymerization (VP).

Este proceso desarrollado a mediados de los 80 por Charles Hull, basa su funcionamiento en la reacción de fotopolimerización y posterior solidificación que se produce al exponer a radiación ultravioleta su materia prima: resinas curables con radiación o fotopolímeros.

La reacción de fotopolimerización es típicamente compleja e implica el añadido de diversos agentes químicos. La fabricación de objetos tridimensionales con este tipo de tecnología se implementa mediante el curado de una capa sobre la anterior, que es el fundamento básico de la estéreolitografía (SL)[24]. Una máquina típica de este tipo de procesos puede visualizarse en la figura 2.7.

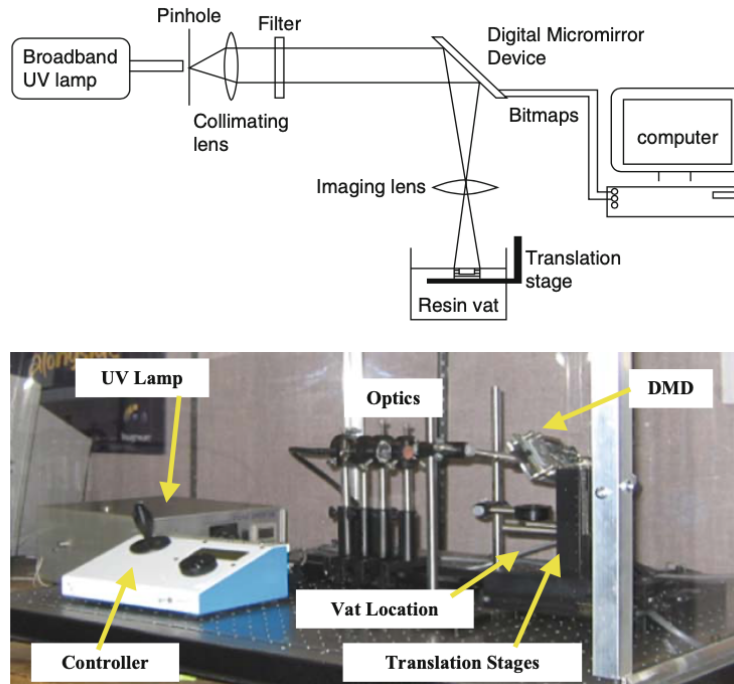


Figura 2.7 Modelo típico de máquina de procesos basados en la fotopolimerización [24].

2.1.6 Powder Bed Fusion (PBF).

Procedimiento de fabricación aditiva en el que el material de fabricación se provee en forma de "partículas discretas". Todos los procesos englobados en este grupo comparten una serie de características básicas que se enuncian a continuación. Incluyen una o más fuentes de energía térmica para inducir la fusión entre las partículas del material de trabajo. Además cuentan con un método para controlar que la formación de estructuras sólidas se de en las zonas adecuadas. Aunque esta tecnología se enfocó inicialmente en la fabricación de plásticos acabó extendiéndose a materiales cerámicos y metales. Una de las técnicas más importantes de este grupo es la denominada "Selective Laser Sintering" o abreviadamente SLS, que funde delgadas capas de polvo (0.1 mm de espesor), previamente esparcidas en la zona de trabajo, usando un rodillo nivelador. La construcción de la pieza tiene lugar dentro de una cámara cerrada y llena de nitrógeno en su forma gaseosa, de este modo la oxidación y degradación del material se minimiza. En la plataforma de construcción o entorno de trabajo, el material se mantiene a una temperatura elevada, ligeramente inferior a sus temperaturas de transición vítrea y/o fusión, lo cual reduce los requerimientos del láser para el proceso. En el SLS, un haz concentrado de CO_2 se proyecta directamente sobre el lecho de polvo formando una sección transversal de la pieza. Posteriormente, de forma similar al resto de metodologías del AM, la plataforma desciende para dejar espacio a una nueva capa de polvo, el proceso se repite tantas veces como capas formen la pieza final. Para finalizar el proceso debe dejarse enfriar la pieza para que pueda ser manipulada. La exposición prematura de la pieza en condiciones ambientales, puede generar la degradación del material por la presencia de oxígeno o por contracciones de éste y sus consecuentes agrietamientos [24].

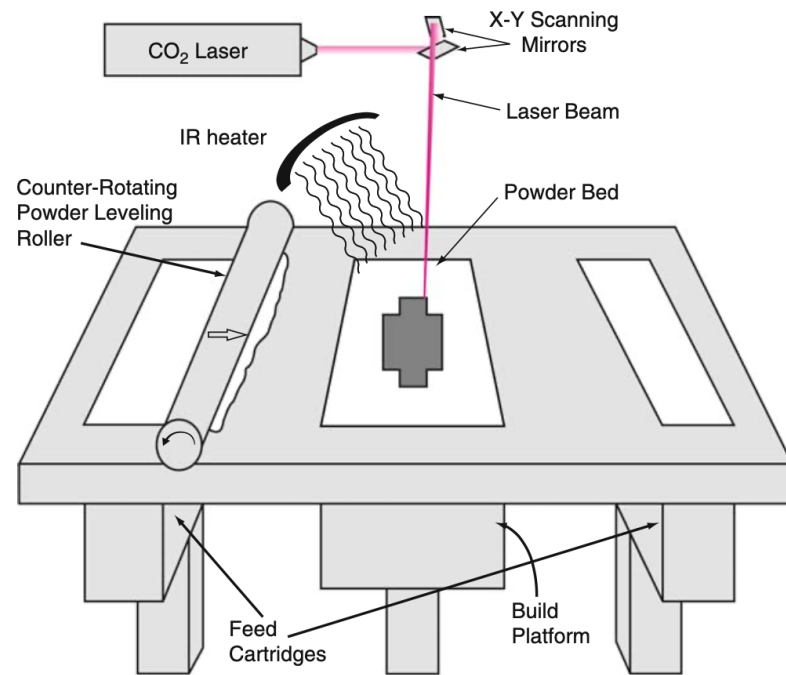


Figura 2.8 Modelo típico de máquina de PBF [24].

2.1.7 Directed Energy Deposition (DED).

Este método consiste en la fusión del material según se va depositando. A pesar de que dada esta definición podría parecer a priori, que pueden utilizarse materiales como polímeros, cerámicas y materiales compuestos de matriz metálica; se usan predominantemente materiales metálicos en polvo. Debido a ello, se conoce comúnmente al método como "tecnología de deposición de metales". Se procede aplicando la energía de forma directa en una región estrecha para calentar el sustrato, fundirlo y simultáneamente fundir también el material a depositar en el depósito de sustrato fundido. A diferencia de lo que sucede en el PBF, con el método DED (directad energy deposition) no se funde un material que ha sido previamente colocado en un lecho de material en polvo; sino que el material se funde según va siendo depositado. Usualmente estos procesos emplean una fuente de calor (típicamente un láser) para fundir la materia prima y construir un modelo tridimensional, de manera similar a los procesos basados en la extrusión. Cada pasada del cabezal crea una ruta de material solidificado, y la unión de estas rutas adyacentes crea una capa. Los modelos de geometría compleja requieren material de soporte o el empleo de cabezales de deposición multiaxiales [18].

2.2 Discusión sobre la elección del método de fabricación

Atendiendo a la información recabada en los apartados anteriores y observando las figuras 2.2 y 2.10, pueden extraerse algunas conclusiones que permitan la elección del proceso de fabricación más idóneo para la aplicación en cuestión.

Atendiendo a la figura 2.10, podríamos en primera instancia descartar aquellas tecnologías de un coste superior. Esto dejaría como posibles alternativas los procesos de la

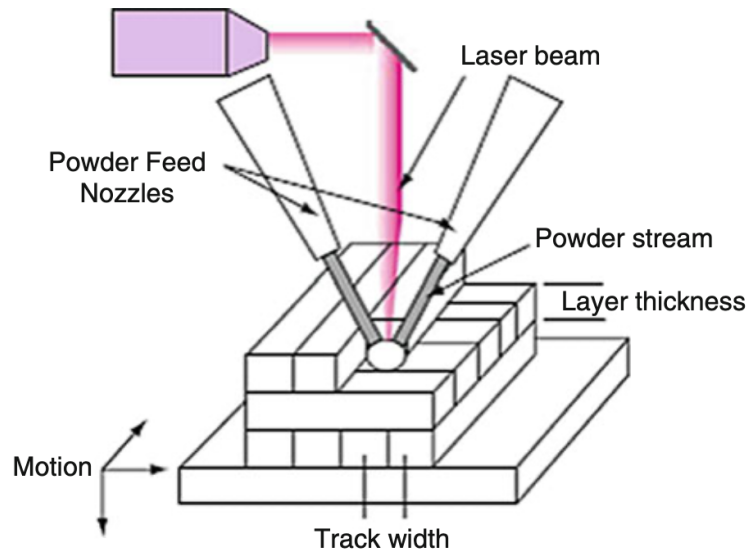


Figura 2.9 Modelo típico de máquina de DED [18].

parte superior de la tabla: ME (sistemas basados en la extrusión), MJ (multijet), BJ (binder jetting) y SL (procesos basados en la laminación).

Si en segundo lugar se prioriza que la pieza final tenga unas propiedades mecánicas aceptablemente buenas, pues la aplicación a considerar someterá a la pieza a fatiga (entre otras condiciones), pueden descartarse Binder-Jetting y los procesos basados en la laminación (SL). El primero de ellos produce piezas con propiedades mecánicas limitadas y si bien es un proceso rápido, dicha velocidad se puede ver mermada por la necesidad de someter al producto a un importante posproceso, lo que conlleva además aumento del coste. El segundo caso, SL, por la propia concepción del método, otorga a la capa de adhesivo todo el peso en la determinación de las propiedades de la pieza.

Finalmente, la decisión a tomar queda entre ME y MJ.

Teniendo en cuenta que las piezas fabricadas mediante MJ, a pesar de su homogeneidad mecánica, poseen una limitada elongación a la rotura y fotosensibilidad, lo cual produce su degradación con el tiempo; no parece a priori un método idóneo. Por otro lado, existe mucha más bibliografía respecto a la fabricación con métodos extrusivos (ME), lo cual nos beneficia a la hora de orientar la optimización de nuestro producto. Aunque el acabado superficial no sea excesivamente bueno y la precisión dimensional no sea óptima, estas desventajas no son transcendentales, pues el acabado superficial no intervendrá en las exigencias de nuestra pletina y la precisión dimensional puede corregirse con un correcto espesor del cordón de filamento.

Por todo ello, optaremos en lo que sigue por centrarnos en el ME (métodos basados en la extrusión) y como optimizar este método para obtener las mejores propiedades para la estructura a desarrollar. Dentro de los métodos basados en la extrusión nos centraremos en el más común de ellos: "Fused Filament Fabrication", es decir la fabricación con filamento fundido, que tal como se mencionaba al comienzo del capítulo, suele aparecer abreviado como FFF.

Proceso	Material	Ventajas	Desventajas	Coste máquina	Aplicaciones y máximo tamaño fabricable [mm ³]
ME	Termoplásticos (PLA, ABS, HIPS, Nylon, PC)	Permite la fabricación multimaterial. Fácilmente escalable. Piezas completamente funcionales.	Anisotropía vertical. Pobre acabado superficial. Temperatura media-alta en el proceso. Baja resolución.	Económico	Repuestos, piezas automóvil, prototipos y plantillas
MJ	Polímeros, plásticos y ceras.	Alta precisión en la deposición. Poco residuo. Permite la fabricación multimaterial. Buen acabado superficial.	Necesita material de soporte. Grupo limitado de resinas y fotopolímeros permitidos. Requiere un considerable control sobre la viscosidad. Limitado a cargas relativamente bajas.	Económico-Medio	Patrones de fundición, prototipos y piezas de electrónica.
BJ	Polímeros, ceras, metales y arenas de fundición.	Amplio rango de materiales disponibles. Alta velocidad de impresión.	Propiedades mecánicas limitadas. Requiere un postproceso importante.	Económico-Medio	Prototipos, patrones de fundición y moldes.
SL	Películas de metal, cerámicas y plástico.	Alta velocidad. Fácil manipulación del material.	Posible necesidad de postproceso. Calidad dependiente del adhesivo empleado.	Económico.	Prototipos, piezas de plástico y UP.
VP	Fotopolímeros.	Piezas de gran tamaño. Alta precisión dimensional. Buen acabado superficial. Alta velocidad.	Baja vida útil. Pobres propiedades mecánicas de los fotopolímeros.	Material costoso.	Prototipo rápido, herramientas y patrones de colada.
PBF	Polvo de polímeros, metales y materiales cerámicos.	Amplio rango de materiales disponibles. Buenas propiedades mecánicas. Alta precisión dimensional.	Proceso lento. Falta de integridad estructural. Elevada potencia requerida. Acabado dependiente del tamaño del polvo empleado. El polvo no sinterizado no se recicla bien.	Medio-Alto.	Prototipo rápido en la industria aeronáutica, automovilística, y dental, así como en joyería.
DED	Metales	Permite control sobre la formación del grano estructural. Buenas propiedades mecánicas.	El acabado superficial se relaciona con menores velocidades del proceso.	Medio-Alto.	Industria aeronáutica, militar, así como reparaciones de objetos metálicos y satélites.

Figura 2.10 Tabla comparativa de los diferentes procesos de AM [4].

3 Parámetros que afectan al proceso.

Cómo es característico de los métodos de fabricación aditiva, la selección del proceso, junto con la selección del material, dotan de un comportamiento muy característico a las piezas finales. Es por ello, que son muchos los parámetros a tener en cuenta para poder predecir de manera adecuada el comportamiento del producto. En la figura 3.1 se muestran algunos de estos factores, ilustrando en que parte del proceso deben configurarse y las propiedades que se ven afectadas por ellos. Nos centraremos a partir de ahora en un método concreto de la fabricación aditiva: el basado en la extrusión (ME). Más concretamente, dentro de este conjunto, se estudiará la fabricación por deposición de filamento fundido (FFF). En este apartado se introducirá un poco más en profundidad su funcionamiento y se pasará posteriormente a detallar aquellas variables que afectan al comportamiento mecánico de la pieza resultante.

3.1 Influencia del material.

La materia prima se conduce al proceso de extrusión ya sea en forma granulada o bien como filamento. Dichas materias suelen ser comúnmente polímeros, los más frecuentemente usados son Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA). A continuación se muestran las diferentes características de algunos de los polímeros más empleados en el sector en el proceso previo a la deposición al que se someten, pues éste, puede alterarlas.

Algunas de las propiedades más determinantes en la calidad de la pieza son las que siguen.

- Humectabilidad ("wettability"). Capacidad del polímero de mojar otra superficie sólida. Esta propiedad mejora la capacidad de adhesión del material, lo cual es de gran importancia entre capas.
- Viscosidad. Es la resistencia a fluir que presenta el material. Determina la precisión conseguida en la deposición y la capacidad de control, lo cual, a su vez, tiene efecto en las propiedades mecánicas de los componentes impresos. Además está correlacionado con las uniones dentro de la cadena polimérica (mayor viscosidad, unión más fuerte de la cadena y viceversa).

Factores	Aspecto	Propiedades afectadas
CAM	<ul style="list-style-type: none"> • Dirección de impresión. • Estrategia de deposición. <ul style="list-style-type: none"> - Densidad de ocupación. - Número de contornos. - Espesor de pared. - Espesor de capa. - Ángulo de deposición. - Patrón de llenado. • Superposición de las fibras. • Número de capas superiores e inferiores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acabado superficial de la pieza. • Propiedades mecánicas. • Precisión dimensional de la pieza. • Eficiencia y efectividad del proceso.
Impresora (FDM ó FFF)	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros de extrusión: <ul style="list-style-type: none"> - Rapidez de alimentación. - Gradientes de presión y temperatura. - Diseño de la tobera. 	
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilidad. • Viscosidad. • Comportamiento electrostático. • Temperatura de transición vítrea. • Temperatura de fusión. 	

Figura 3.1 Resumen de factores del FFF que influyen en las propiedades de la pieza [4].

- Comportamiento electrostático. Afecta a las propiedades de adhesión y separación del material con otras superficies.
- Temperatura de transición vítrea. Temperatura a la cual el polímero comienza a fluir.
- Temperatura de fusión.

Sin embargo, como ya se ha indicado anteriormente, el propio proceso interviene alterando las propiedades del material. Este cambio depende de tantos factores que hoy día es difícil predecir, para cada material e impresora, las propiedades de la pieza final. Es aquí, donde entra en juego el ensayo.

En lo que sigue y empleando la información proporcionada por otros autores, se profundizará en el estudio de los materiales más comunes en el proceso de fabricación aditiva mediante deposición de filamento fundido (FFF). Posteriormente, con la información recabada se hará una comparativa atendiendo a sus ventajas y desventajas para este método.

- PLA (Ácido Poliláctico). Es uno de los polímeros más comercializados actualmente y se conoce principalmente por ser un poliéster alifático extraído de fuentes naturales. Se caracteriza por su alta resistencia y dureza, así como por su baja toxicidad. Por otro lado, entre sus desventajas se encuentran su fragilidad, su pobre cristalización y la baja temperatura a la que se producen deformaciones [29].

- **ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).** Los filamentos de este termoplástico son ligeros y resistentes mecánica y químicamente (lo que favorece la adecuada adhesión entre capas).

Este material es menos frágil que el filamento de PLA y comparado con éste, presenta una mayor dificultad de impresión. Por otro lado, si bien se comentaba que es menos frágil que el PLA, sus módulos elásticos suelen ser más bajos que los de éste otro.

Como ventajas destacan su estabilidad bajo cargas y sus propiedades eléctricas, que se mantienen casi constantes en un amplio rango de frecuencias. Además, dichas características se ven muy poco afectadas por la temperatura y humedad ambientales, para un rango considerable de éstas (dentro del cual se sitúan las condiciones de trabajo). Ha de evitarse, sin embargo, sobrepasar dichas condiciones, pues el material presenta problemas de inflamabilidad a altas temperaturas. El contacto con la luz solar también puede ocasionar daños, aunque debido a nuestra predisposición a encapsular el elemento esto no debería ser ningún impedimento.

En general, las piezas desarrolladas en este material se benefician de una mayor densidad "real", indicativo de una menor porosidad, propiedad que a su vez está íntimamente relacionada con el ángulo de llenado o deposición del filamento (también puede encontrarse como "raster angle"). Una mayor densidad dota a las piezas resultantes de una mayor resistencia a tracción y, para una misma orientación de las capas (XY), valores de entorno a 45° para el ángulo de llenado proporcionan una mejor respuesta [16].

- **PA (Poliamidas).** Las poliamidas son termoplásticos empleados en un amplio rango de aplicaciones en diferentes industrias.

- El Nylon es un polímero semicristalino perteneciente al grupo de las poliamidas. Es conocido por su bajo peso específico, su alta resistencia a tracción, a flexión y su capacidad de fatiga, entre otras propiedades. Debido a estas características ha llamado la atención de la industria de la fabricación aditiva, que también ha incorporado filamentos del material a procesos como el FDM, aprovechando así su característica fluidez [8].

El Nylon es principalmente usado en los sectores aeroespacial y automovilístico, donde es un activo importante por su resistencia a fatiga y a impacto, así como por su capacidad de absorción de vibraciones [23].

- **PAHT CF15.** Esta variante de la poliamida básica aporta una mayor estabilidad dimensional y un rango de temperaturas de trabajo que se extiende hasta los 150°C. Las siglas CF15 hacen referencia a que este compuesto lleva un 15% de carbono como refuerzo, lo cual lo hace más rígido. Este filamento en concreto permite la fabricación aditiva de piezas de avanzados requisitos mecánicos y proporciona al producto final una mejor estabilidad dimensional y resistencia química. En resumen, PAHT CF15 combina elevadas resistencia térmica y química con unas mejoradas propiedades mecánicas. Su procesamiento es fácil y está al alcance de cualquier impresora 3D con una tobera de salida reforzada [11].

- **PP (Polipropileno).** Es un termoplástico derivado del propeno. Es relativamente asequible y pese a ello, muy versátil. Ello se debe a sus buenas propiedades mecánicas,

a su resistencia química y a ser inerte químicamente. Su uso en fabricación aditiva se centra principalmente en los métodos basados en la extrusión, sin embargo, debido a su naturaleza semicristalina, la precisión dimensional de las piezas finales suele ser pobre pues el material se contrae y dobla durante el proceso. Fundamentalmente se emplea en la industria automovilística [38]. La semi-cristalinidad es una propiedad altamente relevante para la impresión 3D, pues puede afectar de manera positiva a las propiedades mecánicas y la resistencia química de la pieza final [3].

Dentro de los polipropilenos, destaca el PP GF30. Este compuesto, especialmente empleado en FDM, contiene fibras de vidrio a modo de refuerzo, las cuales permiten a las piezas fabricadas con este material soportar cargas mecánicas y condiciones de temperatura no aptas para el PP. En cuanto a las condiciones exteriores, PP GF30 presenta resistencia UV lo que, a diferencia del PP, le permite exponerse directamente a la luz solar sin riesgos; por otro lado, este material corrige la mala tolerancia a la humedad del PP. Estas características, convierten al PP GF30 en una excelente alternativa al PP para ambientes de trabajo con condiciones de elevada humedad y exposición solar [14].

- PET (Poliéster). Son polímeros de tipo termoplástico. Dentro de este grupo, encontramos el PET-G, uno de los polímeros más empleados en el ámbito de la ingeniería actualmente debido a sus buenas propiedades mecánicas. Destaca frente a otros termoplásticos por su fuerza, tenacidad, brillo, resistencia a impacto y permeabilidad [19].
- Nanocomposites. Son materiales sólidos multifase en los que una de las fases tiene una dimensión inferior a los 100nm. Los refuerzos pueden estar en varias formas (partículas, láminas o fibras). La más común de ellas son los nanoclays, nanopartículas de silicatos [3].

Ya se han mencionado en esta lista algunos de ellos como el PAHT CF15 y el PP GF30. Sin embargo, se considera importante hacer algún comentario general sobre este tipo de filamentos.

En este tipo de filamentos la morfología y la disposición de los refuerzos, resultan determinantes para las propiedades de la pieza final. Cuando se trabaja con estos materiales han de considerarse factores como el tamaño, forma y naturaleza de las partículas de refuerzo, la interacción refuerzo-matriz, su orientación y dispersión y la cantidad de refuerzo.

También resultan cruciales los métodos de fabricación de estos filamentos, pues son necesarios extrusores de doble husillo (véase la figura 3.2) para favorecer que el grano del material se fragmente y se favorezca su mezclado o difusión en la matriz. Todo ello suele repercutir en el precio final del filamento, incrementándolo [3].

3.2 Influencia de los parámetros de impresión.

En cuanto a los parámetros de ajuste de la impresora, tenemos por un lado la geometría de los filamentos (el grosor y la longitud de las fibras individuales), así como la estrategia de deposición, la cual a su vez queda determinada con un cierto número de variables. Por ejemplo, suelen dar buenos resultados estrategias de deposición que

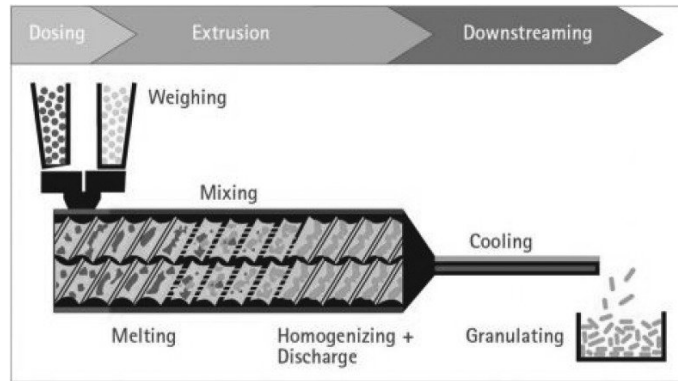


Figura 3.2 Extrusor de doble husillo, típico en la fabricación de filamentos compuestos.

colocan un contorno continuo de la sección 2D (del modelo 3D), antes de rellenar el espacio interior con un patrón de llenado determinado, a esto se le denomina "Shell", haciendo referencia a su función de cáscara en la pieza. Centrándonos un poco más en estos parámetros. Se distinguen:

- Dirección de impresión (printing orientation). La orientación de la pieza en relación a los ejes cartesianos del movimiento de la impresora. En general la superficie sobre la que se imprime será considerada el plano XY y el movimiento que realizará la máquina desplazando la pieza a fin de dejar espacio para una nueva capa, movimiento vertical, será en el eje Z. Afecta al comportamiento mecánico de la pieza, su precisión dimensional y el acabado superficial, además de determinar la necesidad de soportes de impresión. Normalmente las dos opciones principales se denominan "flat" y "upright". Aunque la nomenclatura cambia según el autor, se ilustra en la figura 3.3 para una geometría semejante a la de una probeta, las direcciones que suelen conocerse como "flat" y "upright" (correspondientes con la primera y tercera imagen respectivamente) [4].

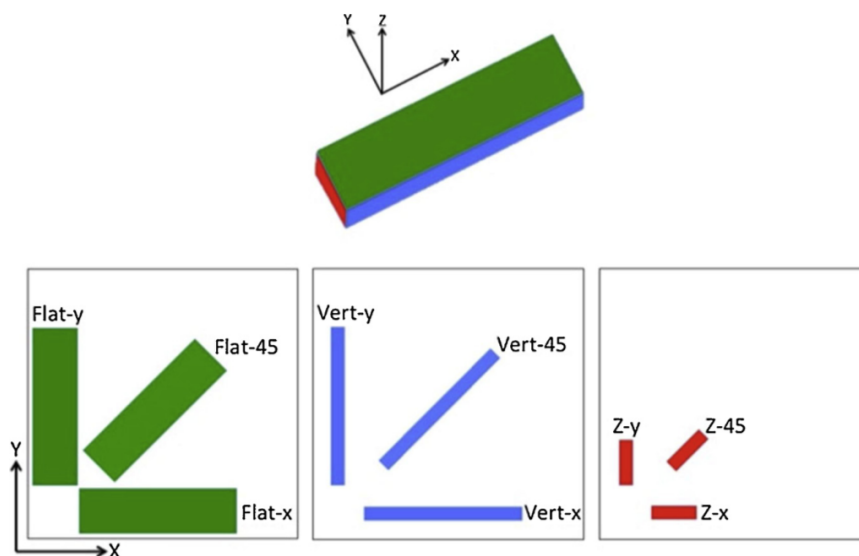


Figura 3.3 Nomenclatura común de las diferentes direcciones de impresión para una probeta con geometría de paralelepípedo [34].

- Parámetros del proceso de extrusión. Son parámetros que suelen venir fijados por la propia impresora y que, normalmente, no son accesibles para su manipulación por el usuario (al menos sin la realización de cambios físicos en la impresora). Estos parámetros engloban a los gradientes de presión y temperatura que sufre el filamento y la geometría y diseño de la tobera de salida, entre otros [4].
- Estrategia de deposición. Se relaciona directamente con los patrones de llenado ("infill patterns"). Para su determinación y control es importante definir[4]:
 - * Densidad de ocupación ("infill density"): determina el nivel de ocupación de la sección y por tanto la cantidad de huecos libres, así como la distancia entre fibras. En general en términos de tensión y compresión, conviene maximizar la densidad de la pieza (disminuyendo la porosidad).
 - * Número de contornos. Hace referencia al número de bordes (o perímetros) que enmarcan la sección. Los contornos suelen denominarse en inglés "shell" haciendo referencia a su función de cáscara protectora para la estructura interna.
 - * Espesor de pared exterior o contorno ("shell thickness"). Es el grosor del contorno exterior de la sección. Suele ser lo primero que se imprime y suele aumentarse para conseguir mejores resultados a tracción y compresión.
 - * Espesor de capa.
 - * Ángulo de deposición del filamento ("raster angle"): ángulo formado por la directriz de un filamento y la dirección del eje X (eje cartesiano principal del movimiento) de la máquina.

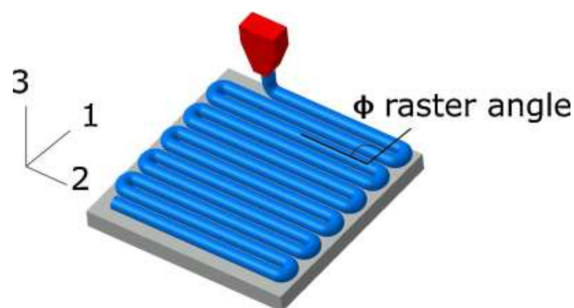


Figura 3.4 Ángulo de deposición del filamento [4].

- * Patrón de llenado ("infill pattern"). Este parámetro describe que geometría seguirá la deposición del filamento. La mayoría de las impresoras traen programados algunos de los más notables como son: rectilíneo, honeycomb y lineal. En el primero los filamentos se depositan formando 45° con el eje X posteriormente en otra pasada se deposita la otra mitad del mallado de modo que los filamentos formen 90° entre sí. Honeycomb hace referencia a la forma hexagonal que describen los filamentos en esta disposición. Por otra parte, el comando lineal genera un patrón de llenado aleatorio con conexiones lineales entre las paredes. Además de estos es posible para el usuario definir su propio patrón de llenado. Para ello, es de especial

utilidad el concepto de “trama del patrón” (o en inglés “raster pattern”), el cual puede definirse como disperso (“sparse”) o doblemente disperso (“double sparse”). Cuando se selecciona “disperso” la impresora deposita una primera capa con la orientación especificada por el usuario y en la siguiente capa los filamentos se depositan desplazados en 90° respecto a la orientación pedida. Por el contrario, cuando se selecciona “doblemente disperso” ambas orientaciones (la especificada y la que forma 90° con ella) se depositan en cada capa [4],[23].

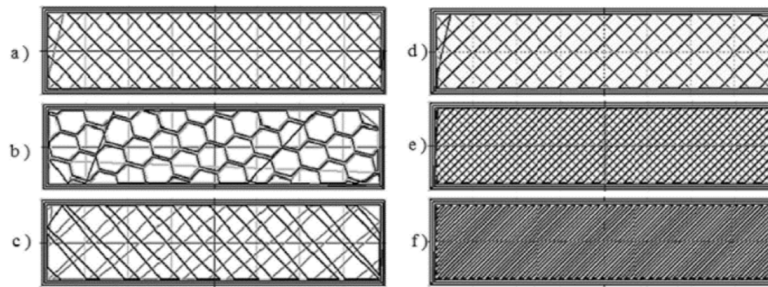


Figura 3.5 Visualización de varios patrones de llenado y densidades de ocupación para una probeta de sección rectangular [9].

- * Superposición de las fibras. Puede producirse para distancias entre fibras (“raster”) ligeramente negativas. Se ha demostrado que reducen la densidad de huecos y aumenta el área de contacto entre fibras, fortaleciendo sus uniones. Como contra tiene que su exceso penaliza la precisión dimensional de las piezas.
- * Número de capas superiores e inferiores. Se refiere a las capas que encierran la estructura interna y tienen un porcentaje de densidad de ocupación del 100%.

3.3 Observaciones generales acerca de las combinaciones de materiales y parámetros de impresión

Como ya se ha comentado, la dificultad que entraña la predicción del comportamiento de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva (o más concretamente mediante FDM), reside en la gran cantidad de parámetros que influyen en el resultado final. Se han señalado algunos de los materiales más comunes y se han descrito someramente las características más singulares de cada uno; por otro lado, también se han definido algunas variables del proceso de impresión que tienen efecto en las propiedades mecánicas de la pieza. Sin embargo, ha de considerarse también la relación entre ambos, pues los ajustes de impresión varían su impacto con dependencia del material.

A continuación se hará una síntesis de las conclusiones extraídas por otros autores acerca de la influencia de los parámetros de impresión sobre determinados comportamientos mecánicos para una variedad de materiales. Nótese que, al ser una recopilación de información de artículos y autores diferentes, ha de considerarse que los resultados han sido obtenidos con métodos y herramientas también diferentes, lo cual induce cambios en los procesos de impresión (temperatura de impresión, tamaño de la boquilla o tobera de salida y en algunos casos hasta patrones de llenado, son solo un ejemplo).

Lo que se pretende con este apartado es extraer afirmaciones generales sobre el proceso de FDM con polímeros, para tener un punto de partida para el estudio que a lo largo de este proceso va a desarrollarse.

3.3.1 Comportamiento a tracción y compresión.

Los muchos ensayos a tracción realizados en polímeros han recalcado la dependencia del comportamiento mecánico con la dirección de impresión.

En concreto, T. Vukasovic, J.F. Vivanco, D. Celentano y G. García-Herrera [45]; estudiaron el efecto de la tracción en el ABS y el PLA, destacando que para este tipo de fuerzas, el mejor comportamiento se corresponde con la situación en que los filamentos son paralelos a la dirección de aplicación, dirección de impresión "flat-X". Mientras que en los ensayos a compresión, se demostraba que, si bien existe una cierta anisotropía, es menos pronunciada que la presentada a tracción. Además ambos ensayos ofrecen resultados diferentes para sus resistencias y módulos de Young. Por todo ello se propone una caracterización bimodular de los polímeros. Dichos fenómenos pueden explicarse teniendo en cuenta que cuando los filamentos se colocan perpendicularmente a la dirección de la fuerza, son las uniones entre éstos los que la tienen que soportar; mientras que, cuando se colocan en la misma dirección de la fuerza, esta es soportada por los propios filamentos que son más "resistentes" que las uniones entre ellos. Por otro lado, hay notables diferencias entre ABS y PLA, por ejemplo, el primero se ve mucho más afectado, en general, por la dirección de impresión que el PLA, que presenta mayores resistencias y módulo de Young [45].

Puede decirse que, en general, también la densidad de ocupación y la orientación de los filamentos o su posicionamiento relativo son un factor importante en el comportamiento a tracción de las piezas de FDM [9]. En cuanto a los patrones de llenado, el

trabajo de M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz y A. Conejero [9], se centró en determinar como afectaban estos y el porcentaje de ocupación al comportamiento a tracción para el ABS. Se probaron 3 patrones básicos: lineal, rectilíneo y honeycomb (véase la imagen 3.5). Todos ellos impresos según la dirección de impresión definida anteriormente como “flat-X”. Los resultados indicaron que el aumento de la densidad de ocupación favorece la resistencia a tracción, pues la cantidad de huecos vacíos en la estructura se reduce (lo cual es favorable, pues la existencia incontrolada de éstos afecta negativamente a las propiedades mecánicas de la pieza). En concreto, cuando la densidad aumentaba desde el 20 % al 50 % la resistencia a tracción aumentaba, pero era mucho más notable el incremento cuando se pasaba del 50 % al 100 %. Esto es aplicable a los 3 casos de estudio, aunque el más notable es el caso lineal, que presentaba para el valor más bajo de la densidad de ocupación el menor valor de resistencia a tracción, sin embargo, para el 100 % de densidad exhibía el mayor valor de todos. Una posible explicación a esto último es la limitación del software empleado por la máquina, que es incapaz de conseguir un verdadero 100 % de densidad de ocupación con los patrones rectilíneo y honeycomb. Con respecto al modulo elástico, también se puede decir que el aumento de la densidad lo favorece. Pero, al contrario de lo que sucedía con la resistencia a tracción su crecimiento es más rápido para densidades de entre el 20 % y el 50 %. Dicho fenómeno podría deberse, como bien indicaba el autor, a que a medida que se forman enlaces entre las diferentes capas (cosa que se ve favorecida por el aumento de densidad de ocupación) se aumenta su capacidad de absorción de las cargas pero disminuye su capacidad de deformación. Además de este artículo se extrae también que la densidad de ocupación, determina en mayor medida que el patrón de llenado; la resistencia y rigidez de la pieza final [9].

Con respecto a la temperatura de la tobera o boquilla de salida, C. Montemagno, K.G. Mostafa y A.J. Qureshi; indicaban en su artículo [23], el escaso impacto de ésta en la fuerza de las piezas fabricadas de ABS. Determinando luego que, el más influyente era el espesor de capas, seguido por el ángulo de deposición de los filamentos y la existencia de vacíos en la estructura. Por último quedaba el ancho del filamento (el grosor de la línea de material depositado por la impresora). Basándose en esta información se realizó, para el Nylon-12, un análisis multivariable en el que se fijaron: la dirección de impresión como “flat” (pues coincidiendo con otros autores la consideraban la óptima), la temperatura, velocidad de alimentación y velocidad de impresión. Obteniéndose que:

- La tensión última a tracción estaba influenciada en un 80 % por el porcentaje de densidad de ocupación, el número de contornos, el espesor de capas y el número de superficies superiores e inferiores.
- El tiempo total requerido para la fabricación del espécimen estaba condicionado en un 81 % por el espesor de las capas, el porcentaje de densidad de ocupación, el número de contornos y el ancho del filamento.
- La tensión última a flexión estaba influenciada principalmente por el porcentaje de densidad de ocupación, el número de contornos, el número de superficies superiores e inferiores y el espesor de capas.

Todos ellos citados en orden de importancia.

Otro factor a tener en cuenta es el empleo de refuerzos o materiales compuestos. El estudio [8], de I. Farina, N. Singh, F. Colangelo, R. Lucionao, G. Bonazzi y F. Fraternali; se centró en optimizar el empleo de filamento Nylon-6. Para ello realizó ensayos con R-Nylon-6 (filamento regenerado a partir de residuos) y añadidos de Al_2O_3 y Al y los comparó con otros filamentos comerciales.

ESPÉCIMEN	AQ27000	Pure NR R-Nylon-6	Blended NR R-Nylon-6	Nylon 11	Nylon 12	NR R-Nylon-6 (A)	NR R-Nylon-6 (B)	NR R-Nylon-6 (C)	Nylon 645
RESISTENCIA TRACCIÓN [MPa]	76,20	9,02	40-83	48	32	21,4	21,53	21,65	35,77
MÓDULO DE YOUNG [GPa]	1,64	0,28	2,6-3,0	1,50	1,30	0,58	0,76	1,17	0,21
ELONGACIÓN A LA ROTURA [%]	40	14	20-60	35	30	18,62	12,74	8,56	186

Figura 3.6 Propiedades mecánicas de varios tipos de Nylon para FDM [8].

Puede observarse en la imagen adjunta (3.6) que, cuanto mayor es el % de refuerzo de Al frente al % de Al_2O_3 , más incrementa el Nylon su resistencia a tracción y su módulo de Young, a costa sin embargo, de una pérdida en el % de elongación a la ruptura. Por otra parte, el añadido de este refuerzo consigue asemejar el comportamiento del Nylon 6 al del filamento de ABS comercial. Los mejores valores a tracción son los presentados por el filamento AQ27000 fabricado por la compañía “ECONYL” a partir de Nylon proveniente de plásticos reciclados. Seguidos estos resultados por el Nylon 11 y Nylon 12, que presentan mejores resistencias a tracción que el ABS pero módulos de Young similares (e incluso más bajo en el caso del Nylon 12) [8].

Para la comparación con el ABS se han empleado los valores recogidos por la tabla resumen 3.7.

3.3.2 Comportamiento a flexión.

Anteriormente se mencionaba que el artículo de T. Vukasovic [45], descubría una mayor dependencia del ABS con la dirección de impresión frente al PLA, en cuanto a comportamiento a tracción y compresión. Pues bien, el resultado arrojado por este mismo ensayo es diferente en lo que se refiere a flexión: mientras que el ABS mantiene un comportamiento similar en ambas direcciones de impresión (flat-X y vertical), el PLA modifica sustancialmente su comportamiento a flexión, pasando a ser considerablemente frágil si se imprime con orientación vertical. Lo cual recalca lo interrelacionadas que están las diferentes variables (propiedades del material y parámetros de impresión) del problema entre sí[45]. La información recabada por C. Montemagno, K.G. Mostafa y A.J. Qureshi[23], resaltaba además para el ABS, que su comportamiento a flexión se veía notablemente mejorado en términos de desplazamientos si se optimizaban los siguientes parámetros: huecos en la estructura,

ángulo entre filamentos, espesor de capas y ancho del filamento depositado (citados en orden de importancia).

3.3.3 Comportamiento a fatiga.

El artículo de L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit y A. Zadpoor [34]; recopila información acerca de la actuación a fatiga de varios polímeros, principalmente: PLA, ABS y ABSplus (ABS aditivado y reformulado para potenciar sus características mecánicas y evitar el warping, es decir, la flexión de las esquinas de la pieza generada por la contracción). Los parámetros que a priori parecen influenciar en mayor medida el comportamiento a fatiga son la orientación de los filamentos, la dirección de impresión, el espesor de las capas y la velocidad de alimentación. Según la información recogida por [34], al ensayar una probeta de prisma rectangular de ABS para diferentes valores del ángulo entre filamentos (0° , 45° , 90° y $45-45^\circ$) se encontró una mejoría considerable en el comportamiento a fatiga para el caso de $45-45^\circ$ (esto es, fibras formando ángulos rectos entre sí y 45° con el eje X). Resultado que se confirmó al ensayar una probeta de geometría “dog-bone” para los mismos ángulos. Al ensayar PLA para valores del ángulo entre filamentos de 0° , 45° y 90° , se observó mejoría en el caso de 45° . Sin embargo, ha de resaltarse que no se comprobó en este estudio, la actuación para $45-45^\circ$.

Además con respecto a la dirección de impresión, se comprobó para ABS y ABSplus, que la más favorable para el comportamiento a fatiga era la Flat-X (ver imagen 2.3). Encontrándose además que, ABSplus era más resistente a fatiga que el ABS convencional. Por otra parte, el artículo de L. Safai [34], resalta que no se puede llegar a una conclusión acerca de si ABS presenta mejor comportamiento a fatiga que PLA (o viceversa) debido a que los ensayos realizados para cada material eran diferentes (provenían de artículos diferentes y las condiciones de impresión podrían serlo también) y arrojaban resultados inconcluyentes.

En general puede decirse que el ángulo entre filamentos tiene un considerable efecto en la vida a fatiga de las piezas de impresión 3D. En concreto, $45-45^\circ$ (o en su defecto 45°) parece ser el valor óptimo de éste, mejorando la actuación de las piezas impresas con (0° ó 90°).

Por otro lado la dirección de impresión determina la dirección en la que la carga se conduce a través de la pieza. El espesor de la capa afecta a la cohesión entre ellas y el porcentaje de ocupación afecta a la rigidez de la pieza [34][37].

Por su parte, O. H. Ezeh y L. Susmel [7], se centraron en el comportamiento del PLA a fatiga, basándose en la influencia de los parámetros ya citados por L. Safai [34], y teniendo en cuenta algunos otros (espesor de capa, porcentaje de ocupación, dirección de impresión, patrón de llenado, velocidad de alimentación, tamaño de la tobera de salida y temperatura de alimentación). El artículo determina en relación a la densidad de ocupación que el comportamiento a fatiga se maximiza para un valor del 75 % en vez del 100 % como cabría esperar (en vista de los resultados para la resistencia a tracción). Por otro lado, la influencia de la orientación de los filamentos, en relación al comportamiento a fatiga, es despreciable, pudiéndose por tanto modelar el PLA como un material homogéneo e isótropo.

3.4 Elección del material. Discusión de la decisión.

A lo largo de este apartado nos apoyaremos en la tabla de la figura 3.7. De ella hemos de destacar que:

- PLA. Las propiedades mecánicas a tensión para el PLA mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de BCN3D [12], las propiedades a flexión, para las cuales se muestra un valor estimado, se han obtenido de [21] y [25]. El precio mostrado es el ofrecido por BCN3D en su web a fecha de Agosto de 2020.
- ABS. Las propiedades mecánicas para el ABS mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de BCN3D [10]. El precio mostrado es el ofrecido por BCN3D en su web a fecha de Agosto de 2020.
- NYLON 12. Las propiedades mecánicas para el ABS mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de Stratasys [42] y contrastadas con los resultados de [8]. El precio mostrado se ha estimado a fecha de Agosto de 2020, comparando el ofrecido por varias empresas del sector de la impresión 3D (este material no se comercializa por BCN3D).
- PP. Las propiedades mecánicas para el PLA mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de BCN3D [13]. El precio mostrado se ha estimado a fecha de Agosto de 2020, comparando el ofrecido por varias empresas del sector de la impresión 3D (este material aunque comercializa por BCN3D, estaba temporalmente fuera de stock).
- PP GF30. Las propiedades mecánicas para el PP GF30 mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de BCN3D [14]. El precio mostrado es el ofrecido por BCN3D en su web a fecha de Agosto de 2020.
- PAHTCF. Las propiedades mecánicas para el PAHTCF mostradas en la tabla son las proporcionadas por el datasheet de BCN3D [11]. El precio mostrado es el ofrecido por BCN3D en su web a fecha de Agosto de 2020.

Como puede observarse se han restringido los posibles materiales a los 6 mostrados en la tabla de la figura 3.7. En dicha tabla se pretende hacer una comparación de sus propiedades mecánicas a tracción y flexión, así como de los precios de mercado de cada filamento. En la parte inferior de la tabla pueden encontrarse el filamento PP GF30 y el PAHTCF, ambos filamentos están reforzados.

Centrándonos en las propiedades a tracción, es observable que aquellos filamentos con mayor módulo elástico a tracción son (en orden): PAHTCF, PLA y PP GF30; mientras que aquellos con menor módulo son (en orden descendente): ABS, Nylon 12 y PP. Ambos grupos bastante diferenciados en cuanto a cifras. Con respecto a la resistencia a tracción el orden sería: PLA, PAHTCF, PPGF30, NYLON12, ABS y PP. En esta ocasión PLA y PAHTCF encabezan la lista por unos 30MPa de diferencia respecto del PPGF30, éste último y el resto de filamentos exhiben valores relativamente similares.

A la vista de estos datos puede notarse que aquellos materiales que exhiben un mejor comportamiento a tracción son los dos filamentos reforzados y el PLA. Si

MAT	Limitaciones y propiedades mecánicas		Precio [€/g]	Limitaciones fabricación
	Tracción	Flexión		
PLA	E[MPa]=3120	E[MPa]=4930	0,04667	Comúnmente empleado. Fácil de usar. Amplio rango de aplicaciones. Menos afectado por la orientación de impresión que el ABS. A efectos de fatiga presenta un comportamiento casi isotrópico.
	TSgtgh[MPa]=70	FSgtgh[MPa]=115,1		
	EI-Break[%]=20	EI-Break[%]=~9		
ABS	E[MPa]=1379	E[MPa]=1406	0,05333	Material que combina rigidez y resistencia a impacto. Con frecuencia dificulta el proceso de impresión.
	TSgtgh[MPa]=29,5	FSgtgh[MPa]=48,3		
	EI-Break[%]=10,9	EI-Break[%]=5,6		
NYLON 12	E[MPa]=1300	E[MPa]=1276	0,08667	El Nylon es un material fuerte, resistente a la abrasión, duradero y está diseñado para poseer mayor grado de flexibilidad y menor absorción de humedad. Según el subtipo de Nylon empleado puede absorber vibraciones (efecto contrario al deseado).
	TSgtgh[MPa]=32	FSgtgh[MPa]=67		
	EI-Break[%]=30	EI-Break[%]=NoBreak		
PP	E[MPa]=470	E[MPa]=1512	0,1	Conocido por su resistencia a agentes químicos. Es inerte y no reacciona con ninguna sustancia con facilidad. Flexible y duradero con alta resistencia a impacto. Pobre precisión dimensional, se contrae y dobla durante el proceso.
	TSgtgh[MPa]=11,9	FSgtgh[MPa]=19,6		
	EI-Break[%]=200	EI-Break[%]=11,2		
PP GF30	E[MPa]=3000	E[MPa]=4130	0,17857	PP con un 30% de fibra de vidrio. Ligero y químicamente más resistente que el PP, de larga vida útil y capaz de resistir las condiciones ambientales. Por su mejor comportamiento térmico puede llegar a superar los problemas dimensionales del PP.
	TSgtgh[MPa]=35,8	FSgtgh[MPa]=89,2		
	EI-Break[%]=4,4	EI-Break[%]=3,9		
PAHTCF	E[MPa]=5052	E[MPa]=6063	0,11333	Poliamida de alta temperatura con refuerzo de fibra de carbono. Resistente a agentes químicos y altas temperaturas. Muy buenas propiedades mecánicas (el 15% de carbono lo hace más duro).
	TSgtgh[MPa]=62,9	FSgtgh[MPa]=125,1		
	EI-Break[%]=2,9	EI-Break[%]=NoBreak		

Figura 3.7 Tabla comparativa y propiedades mecánicas de filamentos para FDM..

ahora se examina su elongación en rotura, tanto PP GF30 como PAHTCF muestran valores significativamente reducidos en comparación, no solo con el PLA, sino con el resto de materiales de la tabla. La explicación a este hecho, podría encontrarse en el mismo razonamiento que realizó [8] para el Nylon reforzado, es decir; que el refuerzo favorece el aumento del módulo elástico así como de la resistencia a tracción del filamento (respecto a los del material de la matriz, en este caso PP y PA), a costa de una reducción de la elongación del material.

Puede entonces decirse que las mejores alternativas con respecto a la tracción resultan ser los filamentos reforzados y el PLA.

Observando ahora el comportamiento a flexión, encontramos un mayor módulo elástico para: PAHTCF, PLA y PP GF30; siendo aquellos con menor módulo (en orden descendente): PP, ABS y Nylon 12. Nuevamente, la diferencia numérica entre los valores de ambos grupos es acusada. Estudiando las resistencias mostradas por cada filamento, la tendencia de los reforzados y el PLA para encabezar la lista se mantiene, se tiene: PAHTCF, PLA, PPGF30, NYLON12, ABS y PP.

Con respecto al comportamiento a fatiga de estos filamentos no se tiene demasiada información, únicamente se conoce que los comportamientos para el PLA y el ABS podrían ser similares. El estudio del comportamiento a fatiga podría ser de interés para trabajos posteriores.

Se repasa ahora toda esta información para tratar de tomar la mejor decisión respecto al material que emplear para la construcción de la estructura de soporte. Según los valores mostrados en la tabla, pueden parecer a priori mejores opciones los materiales reforzados, sin embargo, el rango de precios de éstos oscila entre 2,4 y 3,8 veces el precio más bajo, el del PLA, una diferencia significativa. Sin embargo, dejando el precio a un lado, los filamentos con refuerzo presentan otra dificultad para su implementación: su complejidad. El comportamiento de las piezas fabricadas en impresión 3D ya resulta difícil de predecir por la gran cantidad de parámetros a tener en cuenta y de los que en este texto solo se da una noción introductoria; el hecho de emplear refuerzos podría condicionar el proceso y aunque, sería un buen siguiente paso para este estudio, resultaría, a mi entender prematuro aventurarnos con ellos en esta primera fase.





A	B	C
Property	Value	Unit
 Material Field Variables	 Table	
 Density	1240	kg m ⁻³ ▼
 Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio ▼	
Young's Modulus	3,12E+09	Pa ▼
Poisson's Ratio	0,38	
Bulk Modulus	4,3333E+09	Pa
Shear Modulus	1,1304E+09	Pa

Figura 3.8 Propiedades del PLA empleadas para los análisis en ANSYS.

A la vista de todo lo anterior el PLA comercializado por BCN3D, parece la mejor opción y por tanto, la que se analizará en los siguientes capítulos de este trabajo. Se muestra en la figura 3.8 la ficha del material "PLA BCN3D TFG" creado en ANSYS con las propiedades proporcionadas por la ficha técnica del PLA de BCN3D.

4 Implementación del método de Taguchi. Método de ensayo experimental.

“Cost is more important than quality but quality is the best way to reduce cost.”

GENICHI TAGUCHI, 1924-2012

Actualmente el propósito de la realización de experimentos es esencialmente la optimización y el diseño de análisis robustos. DOE, o diseño experimental, es como suele denominarse a las técnicas usadas para guiar el desarrollo de experimentos de modo que éstos se ejecuten de forma eficiente. De manera general, el proceso de análisis puede definirse como el estudio de las relaciones causa-efecto que pueden inferirse a partir de un determinado número de ensayos. Algunos de los factores más importantes a la hora de diseñar experimentos son la productividad, el coste, la eficiencia y la capacidad de proveer al diseñador de suficiente información cualitativa y cuantitativa. El correcto diseño de los experimentos permite asegurar un desarrollo válido y eficiente de éstos que nos provea de la información necesaria para tomar decisiones [5].

Para evitar el error que suele acompañar a los datos recabados experimentalmente, es recomendable analizarlos empleando métodos estadísticos (tanto en la propia toma de datos como en la replicación de los experimentos). El diseño de experimentos (DOE) es una metodología sistemática que aplica la estadística a la experimentación. Según el DOE se desarrollan una serie de secuencias de test que tienen el objetivo de variar los parámetros de entrada de un proceso o producto para examinar la variación de la respuesta del sistema. Mediante el empleo de DOE, se alcanza una optimización de los costes y el tiempo. Los aspectos más destacables que considerar a la hora de elegir una técnica de DOE son:

- El número de experimentos que puede abordarse. Para ello ha de tenerse muy en consideración el impacto en el tiempo.
- El número de parámetros a evaluar. Dependiendo de la técnica empleada, el incremento del número de factores repercute drásticamente en la cantidad de experimentos requerida.

En el presente capítulo pondremos en relieve algunos de los aspectos más importantes para la realización de los experimentos necesarios para determinar las condiciones óptimas de diseño, enfocandonos en las propiedades a tracción[5].

4.1 Revisión del "Método de Taguchi"

El método de Taguchi es un método estadístico desarrollado por Taguchi y Konishi que inicialmente se desarrolló para mejorar la calidad de los procesos de fabricación, pero que, posteriormente, se expandió a muchos otros campos de la ingeniería.

Esta metodología presenta una ventaja fundamental en el ámbito de la realización de experimentos: la reducción del número de ensayos y su consecuente disminución en el coste.

Puede tomarse como referencia, por ejemplo, el método factorial, cuyo uso es extendido en el ámbito de la ingeniería. Con él, pueden detectarse la influencia sobre la respuesta del sistema, tanto de las diferentes variables, como de la interacción entre ellas. Sin embargo, como su propio nombre indica, esta metodología requiere un número de test que crece factorialmente, siendo por ello, frecuentemente alto.

Así, siendo N el número de variables de estudio o parámetros, K el número de niveles de dichas variables y, finalmente, T el número de ensayos a realizar para completar el experimento según el método factorial; se cumple que:

$$T = K^N \quad (4.1)$$

Es fácil comprobar que para experimentos de elevado número de variables y/o niveles, la cantidad de ensayos requerida aumenta considerablemente, y consecuentemente, también lo hace el coste. Una solución a esta problemática es la ofrecida por Taguchi.

Los avances de Taguchi en el diseño basado en múltiples variables, han sido ampliamente reconocidos por la estadística. Este éxito se basa principalmente en una metódica selección de los parámetros y su interrelación, de modo que se determinen aquellos más influyentes y se diferencien de aquellos otros denominados "ruido". Con ello Taguchi consiguió desarrollar una metodología fundamentada en la estadística que es capaz de predecir, con pocos ensayos, la influencia de los parámetros "señal" sobre sistemas complejos de muchos factores de influencia.

4.1.1 Los pasos del "Método Taguchi"

Para la correcta ejecución del método, Taguchi propuso una serie de pautas que seguir. Se detallan a continuación. [2].

Determinación de las variables principales y sus efectos colaterales.

Los parámetros pueden denominarse, parámetros de diseño (o control), si son variables cuya elección corresponde al usuario y que no se ven modificados o afectados por ningún otro parámetro una vez su valor queda establecido. Estos serían los parámetros "señal" [2], [26],[35].

Dentro de éstos han de seleccionarse aquellos con un efecto más significativo en el resultado. Como este paso es previo a la realización del propio experimento, Taguchi insta a realizar un breve estudio preliminar y a consultar bibliografía sobre el tema en cuestión.

En nuestro caso, serían buenos candidatos a factores "señal" (según la bibliografía consultada): el porcentaje de densidad de ocupación, el patrón de llenado, el espesor de las capas, el espesor de filamento (en el plano de deposición) y el ángulo de deposición de los filamentos. (Veáse el punto 3.3.1).

En concreto, [29], estudiaba los efectos en la resistencia a tracción de probetas de PLA con patrón longitudinal (los filamentos se depositan paralelos y sin espacio entre ellos). Los parámetros elegidos fueron el ángulo de deposición, el espesor del cordón de filamento y el espesor de la capa depositada. Los autores encontraron un predominio de la influencia del ángulo de deposición sobre los otros dos factores. En particular, cuando las fibras estaban alineadas con la dirección de aplicación de la carga, la resistencia a tracción mejoraba. Teniendo esto en cuenta, se decide priorizar el estudio del ángulo de deposición frente al espesor del cordón de filamento en el plano de deposición y el espesor de la capa.

Por otro lado, cabe destacar, que como ya se indicó con anterioridad, la dirección de impresión se fija como "flat-X". Esto se elige así en el estudio pues, a pesar de tener este parámetro una influencia considerable sobre las propiedades mecánicas, presenta un óptimo relativamente marcado para la configuración "flat-X". Este efecto queda reflejado también en el trabajo de [1] para el ABS, entre otros.

Considerando lo anterior pueden limitarse los factores "señal" al porcentaje de densidad de ocupación, el patrón de llenado y el ángulo de deposición de los filamentos.

Como efectos colaterales se hace referencia a la posible interrelación de los parámetros señal. En nuestro caso, debido a la elección hecha, no nos preocuparemos por este tipo de interacción pues, a priori, puede decirse que los factores seleccionados son independientes o que su interrelación se desprecia (según la bibliografía consultada).

Determinación de los factores "ruido" y las "características de calidad".

Los factores denominados "ruido" son aquellos imposibles de fijar y controlar para el diseñador del experimento. Un ejemplo para nuestro caso de aplicación podría ser la aparición de microcavidades en la estructura de la probeta, fijado un porcentaje de densidad de ocupación.[26], [35], [2].

Generalmente, por "características de calidad" se hace referencia a aquellos criterios empleados para determinar la buena calidad del producto final. Puede ser un único aspecto (como el valor de la dureza de la pieza o su módulo elástico) o bien una conjunción de características (por ejemplo el aspecto visual de la pieza junto con la resistencia a impacto de ésta). En el último caso sería necesario seguir un criterio de evaluación general (OEC) para determinar en función de las múltiples variables, el éxito o fracaso del producto. Un ejemplo de OEC para N factores sería: [26].

$$OEC = (x_1/x_{1_{ref}})W_1 + (x_2/x_{2_{ref}})W_2 + \dots + (x_i/x_{i_{ref}})W_i + \dots + (x_N/x_{N_{ref}})W_N \quad (4.2)$$

Donde los W_i son el factor de peso de cada variable, $x_{i_{ref}}$ es el valor de referencia de cada variable y finalmente, x_i es el valor obtenido realmente en el experimento.

En nuestro caso, como se pretende realizar una optimización del comportamiento a tracción y flexión, la característica de calidad será la resistencia a tracción o flexión de la probeta, según corresponda, y por ser de tipo discreto, no sería necesario emplear ningún criterio de evaluación general.

Identificación de la función objetivo.

Es intuible que la determinación de la característica cualidad tiene gran impacto en la elección de la función objetivo (con frecuencia también denominada función de pérdidas). Tras la selección de ésta, Taguchi pide que se distinga si se desea maximizar nuestra característica de cualidad; si por el contrario, queremos minimizar su valor, o si se pretendemos aproximarnos o alcanzar un valor nominal de ella. Tratándose nuestro caso de mejorar el comportamiento a tracción, debemos elegir la función "Larger the better", que busca maximizar la característica de cualidad (resistencia a tracción de la probeta).

Para cada función objetivo, se define una medida del ratio "señal-ruido", S/N , que puede definirse también como la inversa de la varianza y que proporciona una estimación de la irreversibilidad del proceso. Usualmente se trabaja con su forma logarítmica, SNR. Más adelante se dará una noción cualitativa del significado de esta función y se profundizará ligeramente en sus implicaciones. En nuestro caso, para la función de pérdidas "Larger the better", SNR, toma la siguiente forma:

$$SNR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] = 10 \log [S/N] \quad (4.3)$$

Donde los denominados " y_i " son las distancias de Mahalanobis, y n , el número de medidas. El valor del ratio anteriormente definido debe calcularse para cada experimento. En base al valor del ratio S/N (o análogamente del valor de SNR) y al efecto en la respuesta, respecto al valor deseado de ésta; pueden clasificarse los factores según:

- Factores que afectan a ambos, la varianza y la media de la respuesta.
- Factores que afectan únicamente a la varianza.
- Factores que afectan únicamente a la media.
- Factores que no afectan a ninguna de las dos.

Aquellos factores en el primer y segundo grupo pueden ser empleados para la reducción de la variación del sistema, haciéndolo más robusto. Por otro lado, los factores pertenecientes al tercer grupo se emplean para ajustar el valor de la media y aproximarlos al valor deseado. Finalmente, los pertenecientes al cuarto grupo, se ajustan atendiendo a factores económicos, de modo que se reduzcan los costes. [47],[35], [5].

Elección de los factores de control y sus niveles. Elección de la Formación Ortogonal de Taguchi.

En este punto deben seleccionarse de entre los factores "señal", aquellos que se deseen analizar. Como previamente se indicó, se seleccionarán para el caso bajo estudio:

- El porcentaje de densidad de ocupación.
- El patrón de llenado.
- El ángulo de deposición de los filamentos.

Queda pendiente únicamente, la elección de los niveles, entendiéndose estos por el número de valores que se van a estudiar para cada factor de control (de los anteriores). Debe tenerse presente que la cantidad niveles y el número de factores determinan según la tabla de Taguchi (véase la tabla 4.1), la cantidad de experimentos a realizar.

Número de factores de control	Número de Niveles			
	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25
3	L4	L9	L16	L25
4	L8	L9	L16	L25
5	L8	L18	L16	L25
6	L8	L18	L32	L25

Figura 4.1 Formación ortogonal de Genichi Taguchi [5].

El propósito principal de la tabla ortogonal de Taguchi es determinar qué parámetros influyen realmente en la señal de salida. Según [33], este método cumpliría una función similar a la de un instrumento de medida que detecta el efecto de los parámetros señal (ignorando el posible ruido). Es por ello que, para estudios preliminares suelen ser suficiente 2 niveles por factor. Una vez se tienen los resultados, se examina la gráfica resultante para el S/N y se eligen como parámetros señal aquellos cuya influencia es mayor, únicamente estos serán objeto de estudio para la optimización de la señal de salida. Se considera una buena práctica para mantener la efectividad del método, limitar el número de parámetros elegidos a una cantidad entre la mitad y los dos tercios del número total de factores considerados inicialmente. El resto de factores, los no elegidos, adoptan un valor constante para la siguiente fase del experimento. Este primer paso puede omitirse en nuestro caso, si se atiende a los resultados obtenidos por los autores consultados en la revisión bibliográfica, puesto que ya han determinado ellos los factores que resultan más relevantes.

La tabla ortogonal puede, por supuesto, contruirse con un número de niveles superior a 2. En concreto, el empleo de 3 valores por parámetro es particularmente ventajoso pues permite reconocer de manera directa la existencia de relaciones lineales entre los factores y la señal de salida, la existencia de valores extremos ("picos" de la función, óptimos o mínimos), o la saturación. Además este número de niveles permite la interpolación o extrapolación de la respuesta del sistema. Por su parte, el empleo de un mayor número de niveles (por encima de 3) no produce un aumento significativo de la información [33].

En vista de todo lo anterior, se determina que unos 3 niveles para cada factor puede ser una solución de compromiso apropiada para el presente problema. Con este arreglo de niveles y factores de control, el método de Taguchi requeriría la realización de 9 experimentos, un número bastante más razonable que los 3^3 del método experimental. La anterior diferencia en el número de especímenes a fabricar se hace aún más relevante si se tiene en cuenta que las respectivas normativas instan a repetir cada espécimen 5 veces [$\Delta = 5 \cdot (3^3 - 9)$].

Construcción de la matriz de Taguchi.

La principal ventaja de la tabla ortogonal de Taguchi es que el experimento está equilibrado, es decir, que para cada nivel de cualquiera de los factores, todos los niveles de cada uno de los factores restantes aparecen un mismo número de veces. Por tanto, el efecto de un factor es separable del efecto del resto de factores, lo que provee al método de la independencia estadística necesaria para el análisis del efecto de cada factor. La segunda ventaja de esta tabla es la eficiencia en el coste de producción del experimento, en términos del número de especímenes necesitado. Como la tabla de Taguchi está equilibrada, no requiere analizar cada una de las combinaciones posibles de factores y niveles. Como consecuencia de esto,

la matriz resultante se ve reducida sin perder ninguna información vital para el experimento; es decir, que estima el efecto de los factores con un menor número de experimentos que el requerido por un análisis de tipo factorial [36].

Para este trabajo, la construcción de la matriz de Taguchi se ha realizado con el empleo de la herramienta "Minitab".

Análisis de resultados y predicción del óptimo.

Para poder analizar correctamente un experimento llevado a cabo con el método de Taguchi han de tenerse presente diversos conceptos.

La robustez de un sistema o modelo suele definirse como la habilidad para "reaccionar" de manera efectiva ante un cambio en sus variables; de este modo, un sistema que posea esta característica es capaz de operar sin fallo ante una variedad de condiciones operativas. Taguchi se centró en este concepto y determinó que el parámetro crítico para minimizar las pérdidas e incrementar la calidad, debía estar relacionado con el índice valor deseado-valor obtenido. Este índice es el denominado ratio señal-ruido, S/N, que se puede definir en términos generales como la medida (en [dB] si se expresa como SNR) del ratio entre la potencia de la señal y la del ruido:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Signal power}}{\text{Noise power}} \right) \quad (4.4)$$

Donde "señal" y "ruido" se interpretan generalmente como valor medio y desviación media del índice. El significado de esta relación se deriva de la analogía en la Teoría de la comunicación: "los valores para el mejor diseño no son los que maximizan la señal sino aquellos que resultan efectivos reduciendo el ruido producido por la variabilidad de las variables no controlables del sistema". Así pues, para Taguchi, la calidad del sistema no venía únicamente dada por el valor medio de la variable de salida, sino que se consideraba importante también, la capacidad del sistema para mantener el valor de la salida en un límite aceptable, ante cambios externos. Lo anteriormente expresado puede traducirse en el deseo de alcanzar el valor más alto de S/N (o análogamente, SNR), con independencia de la función de pérdidas [15].

Otra interpretación es la ofrecida por Ruefer y Herbert en [33], según el cual el ratio S/N es una medida de eficiencia, que expresa la conversión producida en el sistema de un tipo de energía en otro:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Energía convertida útil para el funcionamiento del sistema}}{\text{Pérdida de energía}} = \frac{\text{Efecto deseado}}{\text{Ineficiencia}} \quad (4.5)$$

De este modo, cuanto mayor sea su valor, menor será pérdida de energía en irreversibilidades; es decir, menor será la desviación del sistema de su comportamiento ideal. Pudiendo cuantificarse la actuación del sistema mediante la aplicación objetiva del ratio S/N [33].

Para una correcta optimización del sistema, como primer paso deben diferenciarse:

1. Parámetros que no afectan únicamente al valor medio de la señal de salida pero no a la desviación típica.
2. Parámetros que únicamente afectan a la desviación típica.
3. Parámetros que afectan a ambas (media y desviación típica).
4. Parámetros que no afectan a ninguno de los dos.

Como segundo paso deben elegirse aquellos valores del grupo 2 que maximicen el ratio S/N. Posteriormente aquellos factores pertenecientes al grupo 1, se elegirán de tal modo que el valor medio de la salida se acerque al deseado. Si existen parámetros que afectan a ambos, media y desviación, y además éstas no varían de igual modo ante cambios del parámetro, deberá elegirse su valor intentando que, ante cambios considerables del parámetro, la salida se mantenga entorno al óptimo [15].

Si se tiene todo ello en cuenta y se visualiza la posible gráfica resultante (véase por ejemplo la figura 4.2), resulta intuitiva la determinación del óptimo de forma geométrica, pues éste corresponde con la situación en que cada parámetro toma el valor que maximiza la relación S/N. Siendo el valor global resultante de S/N, en el caso óptimo, la suma de los valores máximos conseguidos por cada variable.

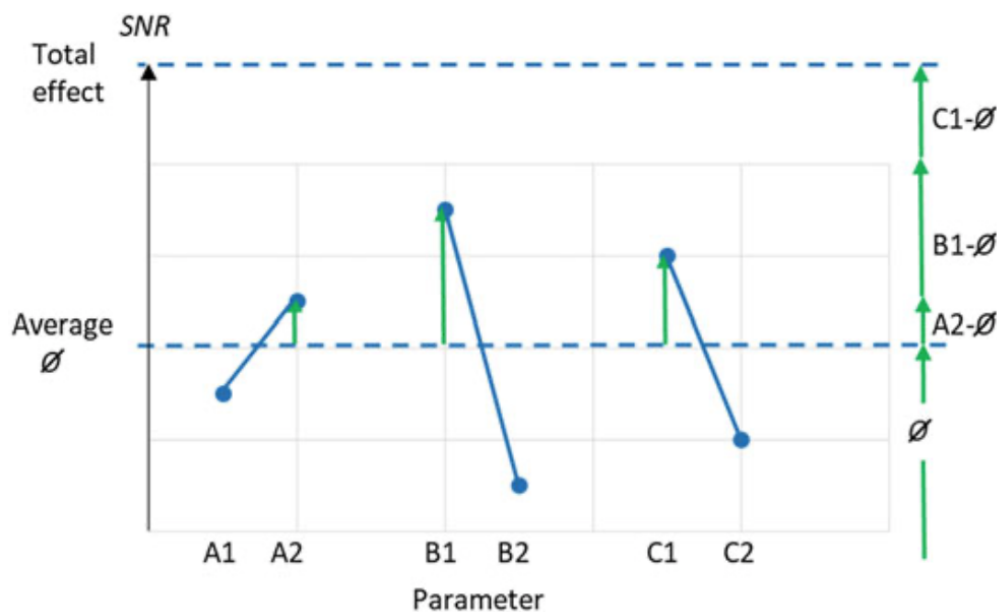


Figura 4.2 Determinación gráfica del efecto global de una combinación favorable de parámetros.

Como se indicaba antes, la inclusión en el estudio de una cantidad significativa de factores con relativamente reducida influencia está desaconsejada. Esto se debe a que el empleo de parámetros con efectos similarmente pequeños, puede producir una propagación del error. Luego, en la situación ilustrada serían los parámetros A y B, los mejores candidatos para un estudio de optimización.

Es destacado también, por Teshima [43], respecto a la evaluación de las gráficas obtenidas por el método de Taguchi, que cuánto más abrupta es la pendiente de la recta, mayor es el grado de influencia del parámetro. Según el autor, eligiendo parámetros de estudio que cumplan con esta cualidad, se generará una matriz con mejor capacidad de predicción. Teshiba menciona además, que, tanto la elección de aquellos valores de los parámetros que generen un menor valor del ratio S/N, como la no inclusión en el estudio de aquellos de mayor influencia; causa un empeoramiento de la predicción del comportamiento. Es decir, vuelve al sistema, más vulnerable ante agentes externos y por ello, menos eficiente.

Validación y verificación de los resultados.

Finalmente, deben realizarse tests de confirmación en las condiciones halladas como óptimas con la metodología de Taguchi para verificar que el comportamiento predicho por éste, es correcto [47].

5 Revisión de la normativa de ensayos.

"Se entiende como normativa el conjunto de normas aplicables a una determinada materia o actividad".

REAL ACADEMIA DE LA LENGUA ESPAÑOLA, 2019

Para que los resultados obtenidos a través de los ensayos propuestos en este trabajo sean válidos y comparables, se seguirá la normativa pertinente para cada uno de ellos. En estas normas se recogen criterios a cumplir tanto por los especímenes (en su forma geométrica y fabricación), como por la propia metodología de ensayo. Se hará hincapié, sin embargo, únicamente en aquellas partes de la norma que hagan referencia a la geometría del espécimen, así como a zonas de aplicación de cargas y condiciones de contorno, puesto que debido a la situación tan excepcional que nos ha ocupado en el presente curso 2019-2020, los ensayos de laboratorio no se han podido llevar a cabo como parte de este proyecto, teniendo que posponerse.

Se pretende, en lo que sigue, justificar el procedimiento de ensayo que se mostrará en el capítulo 6.

5.1 Normativa aplicable al ensayo a tracción. Revisión de la norma "ASTM. D638-14".

Para el tema que nos ocupa en este estudio emplearemos la norma "ASTM. D638-14" [39], que cubre la determinación de las propiedades a tensión de plásticos (tanto reforzados como no) en especímenes de forma de pesa, cuando estos se ensayan bajo unas condiciones definidas de pre-tratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de los ensayos.

Esta metodología está diseñada para proporcionar datos de las propiedades a tensión para el control y especificación de materiales plásticos. Esta información es de utilidad tanto para la caracterización cualitativa, como para la investigación y el desarrollo.

Debido a que las propiedades a tracción varían con la preparación de los especímenes, la velocidad y el ambiente de ensayo, cuando se requieren resultados precisos que comparar, estos factores deben controlarse cuidadosamente.

5.1.1 Maquinaria de ensayos

La máquina de ensayos a emplear debe ser de capaz de mantener constante la velocidad de movimiento de la cruceta y debe comprender y cumplir lo siguiente:

- **Miembro fijo.** La máquina empleada debe tener un miembro fijo que será el portador de una mordaza.
- **Miembro móvil.** El miembro con capacidad de movimiento portará la segunda mordaza.
- **Mordazas.** Las mordazas que sujetarán el espécimen (ubicadas una en el miembro fijo y la otra en el móvil) pueden ser tanto fijas como de auto-alineables.
 - **Mordazas fijas.** Están rigidamente unidas a los brazos fijo y móvil de la máquina de ensayos. Si se emplea este tipo de mordaza debe tenerse especial cuidado para asegurar que el espécimen es insertado y sujetado de modo que el eje longitudinal de éste coincida con la dirección de aplicación de la tracción.
 - **Mordazas autoalineables.** Se ubican en los brazos móvil y fijo de la máquina de ensayos, de modo que puedan moverse libremente para alinearse tan pronto como la fuerza se aplique, de tal manera que el eje longitudinal del espécimen coincida con la dirección de aplicación de la tracción.
 - **Sujección del espécimen.** El espécimen debe estar sujeto de manera que se prevenga y corrija el deslizamiento relativo de las mordazas en la medida de lo posible. Las superficies de las mordazas deben estar marcadas o dentadas con un patrón similar a aquellos realizados con herramientas de un único filo grueso tal que el patrón dentado cuente con una separación de 2.4mm y una profundidad de 1.6mm (que han sido probados como lo más eficientes para la mayoría de termoplásticos). Bordes dentados más finos son más satisfactorios en plásticos más duros (como materiales termoestables). Los bordes dentados deben mantenerse limpios y afilados. Si se produce agrietamiento en las mordazas, incluso empleando bordes dentados profundos o superficies desgastadas, debe recurrirse a otras técnicas. Se han encontrado especialmente útiles para mordazas de cara lisa la abrasión de la superficie del espécimen que estará en contacto con la mordaza, e interponer delgadas láminas de lija abrasiva, plástico o goma entre el espécimen y la mordaza. El papel abrasivo de doble cara nº80 resulta efectivo en muchos casos, al igual que el empleo de tejidos de mallado expuesto en los que los hilos han sido recubiertos de abrasivo. La reducción del área transversal del espécimen también puede ser de utilidad, así como el uso de mordazas especiales para evitar el deslizamiento y la rotura.
- **Mecanismo de transmisión.** Mecanismo encargado de imponer una velocidad uniforme y controlada del miembro móvil respecto del fijo. Esta velocidad debe regularse según se especifica en la norma.
- **Indicador de carga.** El mecanismo de indicación de la fuerza debe ser capaz de mostrar la tensión total aplicada sobre el espécimen cuando este está sujeto por las mordazas. El mecanismo debe estar libre de inercias en las condiciones en las que se realice el test y debe indicar la carga con una precisión del $\pm 1\%$ o superior. La

precisión de la máquina de ensayos debe comprobarse en acuerdo a las "Practices E4".

- Los materiales de los que estén hechos el miembro móvil, el fijo y el mecanismo de transmisión, deben ser tales y en tales proporciones que la deformación del sistema constituido por dichas partes no exceda el 1 % de la deformación longitudinal total entre las marcas de calibración del espécimen de ensayo, en ningún momento durante el experimento y bajo ninguna carga (del rango posible de la máquina).
- Indicador de extensión de la cruceta. La máquina de ensayo debe constar de un mecanismo indicador de extensión adecuado, capaz de mostrar el cambio en la separación de las mordazas, es decir el movimiento de la cruceta. Debe estar libre de inercias en las condiciones en las que se realice el ensayo y tiene que indicar el movimiento de la cruceta con una precisión del ± 10 % del valor indicado.

5.1.2 Extensómetro

Instrumento capaz de medir la distancia entre dos puntos designados dentro de la longitud del calibre, cuando el espécimen se estira. Aunque no es necesario, se recomienda que el instrumento pueda automáticamente grabar la distancia o cualquier cambio en ella, como una función de la carga aplicada sobre el espécimen, del tiempo transcurrido desde el inicio del test, o de ambos. Si se registra como función del tiempo, también será necesario registrar la carga aplicada como función del tiempo. El instrumental debe estar libre de inercias a la velocidad de ensayo. Los extensómetros se clasifican y serán calibrados periódicamente atendiendo a la "Practice E83".

- Medidas del módulo de elasticidad. Para medidas del modulo de elasticidad, debe emplearse un extensómetro con un error máximo en la medida de deformaciones del 0.0002mm/mm y que registre automáticamente y de manera continua. Un extensómetro sujeto a la "Practice E83" cumple la clasificación B-2 y por tanto cumple la anterior especificación.
- Medidas de extensión reducida. Para medir la elongación elástica o pequeñas deformaciones (nominalmente menores o iguales al 20 %), es válido el empleo del extensómetro antes indicado con una atenuación del 20 %. En cualquier caso el aparato debe cumplir al menos los requerimientos de la clase C definida en "Practice E83", que incluyen un error de 0.001 en la medida de deformaciones o del ± 1.0 % de la deformación indicada, lo que sea mayor.
- Medidas de extensión amplia. Para la realización de medidas de elongaciones superiores al 20 % se aceptan técnicas de medición con error no superior al ± 10 % del valor medido.

5.1.3 Micrómetros

Los aparatos empleados para medir el ancho y el espesor del espécimen deben cumplir con los requerimientos del "Test Method D5947".

Cabe aquí realizar un comentario acerca de las anteriores restricciones:

- Se obviarán los comentarios acerca de la velocidad de aplicación de la carga, pues en el presente texto nos centraremos en el modelado teórico en ANSYS de un ensayo "estático estructural".

- La zona de aplicación de la carga, así como el sistema de mordazas empleado en la realidad; se verán notablemente simplificados en el modelo teórico que se analizará en ANSYS.
- Las notas sobre extensómetros y medidores, pueden obviarse en lo concerniente a este texto, pues la medición será directamente el valor resultante del análisis.

5.1.4 Láminas, placas y moldeados de plástico.

- Plásticos rígidos y semirígidos. El espécimen debe cumplir con la geometría detallada en la figura 5.1. El tipo I es el más usado y debe emplearse cuando se dispone de un espesor de material de 7mm máximo. Por su parte, el tipo II se emplea cuando habiéndose empleado el tipo I, el espécimen no rompe por la sección estrecha de la probeta. El tipo V se emplea cuando el material disponible solo cuenta con 4mm de espesor o menos. El tipo III se emplea para materiales con espesores entre los 7mm y los 14mm. El tipo IV se emplea para las comparaciones entre especímenes con diferentes rigideces.

En el caso que ocupa este estudio, el grosor del espécimen no resulta un problema en principio, por lo que se optaría por el tipo I (el recomendado por la norma), de darse el caso detallado anteriormente, se repetiría el experimento con un tipo II.

- Refuerzos de material compuesto. Si el espécimen que se quiere ensayar incluye refuerzos de material compuesto (incluyendo láminas de materiales altamente ortotrópicos), éste debe adoptar la geometría designada como tipo I.

En este texto no se abarca el estudio de plásticos reforzados, por lo que esta última nota no afecta a nuestra elección de la geometría.

5.1.5 Superficies del espécimen.

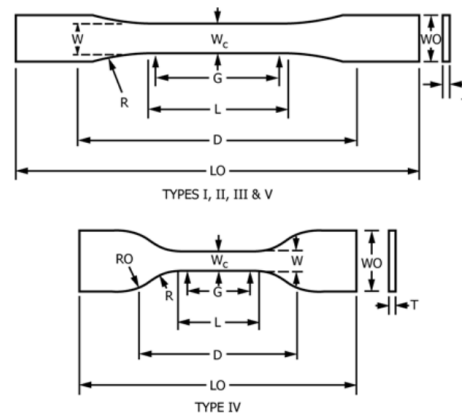
Las superficies del espécimen debe estar libre de fallas, arañazos o imperfecciones. Las marcas dejadas por las operaciones de mecanizado deben ser cuidadosamente eliminadas con un papel de lija fina, las superficies afiladas deben ser suavizadas con papel abrasivo (nº00 o más fino). Las dirección del movimiento de lijado deben coincidir con el eje longitudinal del espécimen. Debe evitarse cualquier perturbación de las superficies del espécimen, así como socavados producidos durante la manufactura del espécimen que excedan las tolerancias dimensionales.

5.1.6 Marcas de medida.

Si es necesario colocar marcas de medición en el espécimen, debe hacerse con un lápiz de cera o tinta india, de modo que no efecte al ensayo del material. Las marcas de medición no deben ser rayadas, perforadas o impresas en el espécimen.

5.1.7 Posible anisotropía.

Si se sospecha que el material de ensayo puede ser anisótropo, deben duplicarse los ensayos, con los ejes longitudinales paralelos y normales a la dirección en la que sospecha la anisotropía.



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A						
Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Figura 5.1 Dimensiones del espécimen según la norma ASTM.

5.1.8 Número de ensayos a cada espécimen.

En el caso de materiales isotrópos deben ensayarse 5 especímenes para cada muestra. Para materiales anisótropos deben ensayarse 5 especímenes en la dirección normal y otros 5 en la dirección paralela al eje principal de anisotropía. Aquellos especímenes que rompan en alguna imperfección o fuera de la sección estrecha de la probeta deberán descartarse y habrá que repetir el experimento (a no ser que dicha imperfección constituya una variable de estudio).

5.1.9 Velocidad de ensayo.

- La velocidad de ensayo se considera como la velocidad relativa entre las mordazas durante el ensayo. Si puede demostrarse que la velocidad resultante (en ensayo) está dentro de los límites de variación permitidos, se empleará la velocidad de desplazamiento de la mordaza móvil cuando no se está ensayando ningún espécimen, vacía.
- La velocidad debe elegirse de la tabla adjunta (5.2), según las especificaciones del material a ensayar. Si no se especifica, se empleará la más baja de la tabla para la geometría elegida de la probeta, que provoque la ruptura entre los 0.5 y los 5 minutos. En el caso que nos ocupa se debería emplear una velocidad de 5 ± 25 % [mm/min]; sin embargo, como ya se ha indicado se va a analizar en ANSYS un modelo estático.
- La determinación del modulo debe hacerse a la misma velocidad a la que se han determinado otras propiedades a tracción cuando el registro de respuesta y la resolución son adecuadas.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	Nonrigid	50 (2) ± 10 %	1
	III	500 (20) ± 10 %	10
	IV	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^ASelect the lowest speed that produces rupture in 0.5 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^BSee Terminology D883 for definitions.

^CThe initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

Figura 5.2 Velocidades de ensayo [39].

5.1.10 Condicionamiento.

- Acondicionamiento del material. Las condiciones de ensayo del espécimen deben ser acordes a lo especificado en el procedimiento A de la "Practice D618", a no ser que esto contradiga alguna especificación relevante de la norma ASTM asociada a ese material. El tiempo de condicionado se especifica como un mínimo. Las tolerancias de la temperatura y humedad deben estar acordes a las especificadas en la sección 7 de la "Practice D618", a no ser que esto contradiga alguna especificación relevante de la norma ASTM asociada a ese material.
- Condicionamiento del ensayo. Las condiciones de temperatura y humedad en las que se realiza el ensayo serán las mismas que las empleadas para acondicionar el espécimen de acuerdo a la sección 7 de la "Practice D618", a no ser que esto contradiga alguna especificación relevante de la norma ASTM asociada a ese material.

A este respecto cabe destacar que se supone en este texto que la pieza final estará debidamente "encapsulada" para protegerla de la interacción directa con el ambiente. Es por ello que las condiciones de temperatura y humedad se considerarán cumplidas. No obstante, queda pendiente un estudio térmico más exhaustivo.

5.1.11 Procedimiento.

- Se mide el ancho y el espesor de cada espécimen, redondeando hasta el 0.025mm usando uno de los métodos aplicables del D5947. Las medidas se toman en la zona central de la parte estrecha del espécimen, a una distancia de 5mm desde los extremos del espécimen.
- Se coloca el espécimen en las mordazas de la máquina de ensayos, teniendo cuidado de alinear el eje longitudinal de la probeta y las mordazas con la línea imaginaria que une los puntos de sujeción de ambas mordazas.
- Añadir el indicador de extensión. Cuando se quiere determinar el módulo, se necesita un extensómetro de clase B-2 o mejor.
- Ajustar y seleccionar la velocidad del ensayo al valor requerido en la Sección 8 e iniciar el ensayo.
- Grabar la curva carga-extensión del espécimen.
- Grabar la carga y la extensión en el límite elástico y también la carga y la extensión en el punto de rotura.

Como ya se ha indicado con anterioridad, las notas sobre el procedimiento son, a efectos del estudio realizado en el presente texto, meramente informativas, pues lamentablemente, en la actualidad, no pueden ejectarse los ensayos de laboratorio.

Una vez revisada la normativa pertinente se modela el espécimen, resultando en una geometría como la mostrada en la figura 5.3. Nótese que a esta geometría habrá que realizarle un vaciado con el programa SpaceClaim y el interior se sustituirá por el patrón de llenado en cuestión. El vaciado se realizará hacia el interior, manteniendo las paredes exteriores y con ellas las restricciones de la geometría. Las paredes tendrán un espesor de 1mm como ya se indicó anteriormente.

5.2 Normativa aplicable al ensayo a flexión. Revisión de la norma "EN ISO 178:2003".

La normativa consultada para el ensayo a flexión es la versión oficial en inglés de la norma "EN ISO 178:2003", [40], que incluye la modificación A1:2005. Este texto detalla el método para la correcta determinación de las propiedades a flexión de plásticos rígidos y semi-rígidos bajo unas determinadas condiciones. Dicha metodología es empleable para la investigación del comportamiento a flexión de los especímenes de ensayo, así como para la obtención de la resistencia y módulo a flexión y otros aspectos de la relación a flexión entre tensión y deformación (bajo unas determinadas condiciones).

El método es aplicable a termoplásticos moldeados o extruídos, incluyendo también aquellos materiales reforzados y láminas de termoplástico rígido, entre otros.

5.2.1 Maquinaria de ensayos

La maquinaria de ensayos debe cumplir con la norma ISO 5893.

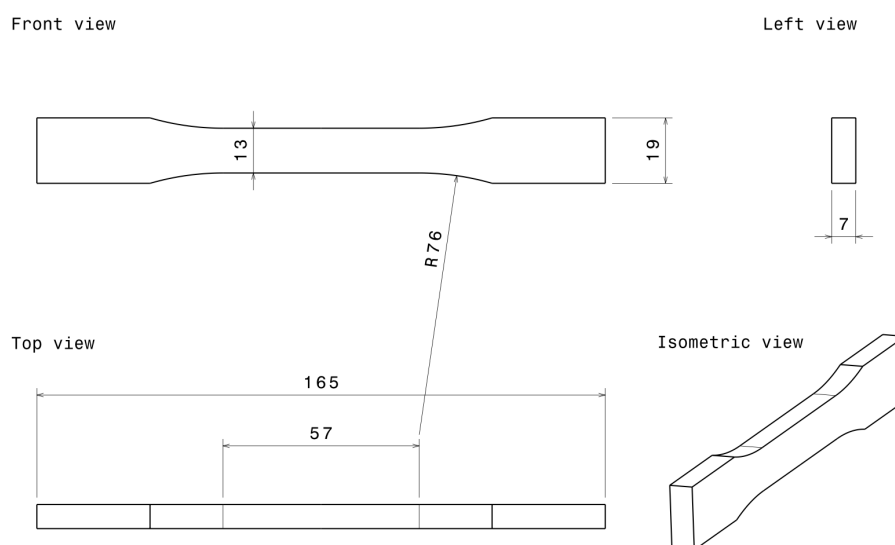


Figura 5.3 Geometría del espécimen a tracción (medidas en mm).

5.2.2 Equipo indicador de fuerza y deflexión.

El error en las medidas de los indicadores de fuerza y deflexión, no debe exceder el 1 % del valor real.

5.2.3 Especimen.

La tipología del espécimen, que por defecto se emplea en este ensayo, es de sección rectangular y no tiene los bordes redondeados. El espécimen debe cumplir las siguientes medidas:

- Longitud, l : 80 ± 2 [mm]
- Ancho, w : $10,0 \pm 0,2$ [mm]
- Espesor, h : $4,0 \pm 0,2$ [mm]

Además, se exige que la desviación del valor del espesor, respecto de su valor medio, en el tercio central del espécimen (a lo largo de la dirección longitudinal), no supere el 2 %. Por su parte, el ancho en el tercio central del espécimen, no puede desviarse más de un 3 %. De no poder cumplirse las medidas anteriores, deberá aplicarse la siguiente relación:

$$\frac{l}{h} = 20 \pm 1 [mm] \quad (5.1)$$

5.2.4 Inspección del espécimen.

Los especímenes deben estar libres de torsiones, las superficies opuestas deben ser perfectamente paralelas y las adyacentes perpendiculares a éstas. Todas las superficies deben estar libres de arañazos, hoyos, marcas de hundimiento y estrías. Estos aspectos deben

comprobarse mediante inspección visual (comparación con esquinas rectas, cuadrados y superficies planas); así como mediante calibres micrómetros. Aquellos especímenes que presenten alguna de las citadas imperfecciones serán descartados o mecanizados hasta alcanzar las dimensiones apropiadas para el test.

Nuevamente, como en este texto se realiza un ensayo teórico y el espécimen será modelado mediante software de diseño 3D (CATIA V5), no hemos de preocuparnos por tolerancias, desviaciones ni imperfecciones asociadas a los procesos de fabricación. Las medidas serán exactas.

5.2.5 Posible anisotropía.

En el caso de materiales que exhiban propiedades físicas dependientes de la dirección, deben elegirse los especímenes de modo que la tensión a flexión se aplique en una dirección idéntica o similar a aquella en la que se verán sometidos los productos en condiciones de servicio. Esta relación entre el espécimen del test y el producto final, será determinante en la factibilidad del ensayo de los especímenes estandarizados.

5.2.6 Número de ensayos a cada espécimen.

Al menos 5 especímenes serán ensayados en cada dirección de ensayo. Si se requiere más precisión del valor medio, pueden ser necesarios más especímenes.

Para excluir los efectos debidos a posibles asimetrías generadas en la fabricación, se recomienda que los especímenes se ensayen siempre orientándolos del mismo modo y siempre colocándolos en contacto con los soportes.

5.2.7 Velocidad de ensayo.

Se define como el ritmo del movimiento relativo entre los soportes y la línea en la que se aplica la carga. Se expresa en [mm/min] y algunos de los valores recomendados son los ilustrados en la figura 5.4.

5.2.8 Condicionamiento.

Las condiciones ambientales vienen determinadas por la norma específica de cada material.

5.2.9 Procedimiento.

El espécimen que se apoya sobre dos soportes, se ve forzado a deflectar su cuerda central hasta la rotura o hasta que se alcance un valor predeterminado de la deformación. Durante el procedimiento, la fuerza aplicada es medida.

Puede observarse, en la figura 5.5, un esquema del ensayo. En éste, se aprecian dos soportes y un eje central en el que se aplica la fuerza. Los soportes y el eje deben ser paralelos a lo largo del ancho del espécimen, con un error de $\pm 0,2$ [mm].

Los radios, R_1 , del eje de aplicación y R_2 , de los soportes, deben cumplir las siguientes dimensiones:

- R_1 : $5,0 \pm 0,1$ [mm]
- R_2 : $2,0 \pm 0,2$ [mm] para especímenes con espesores ≤ 3 [mm]
- R_2 : $5,0 \pm 0,2$ [mm] para especímenes con espesores > 3 [mm]

Table 1 — Recommended values of the test speed, v

Test speed, v mm/min	Tolerance %
1 ^a	$\pm 20^b$
2	$\pm 20^b$
5	± 20
10	± 20
20	± 10
50	± 10
100	± 10
200	± 10
500	± 10
^a The lowest speed is used for specimens with thicknesses between 1 mm and 3,5 mm (see 8.5). ^b The tolerances on the 1 mm/min and 2 mm/min speeds are lower than indicated in ISO 5893.	

Figura 5.4 Valores recomendados de la velocidad de ensayo [40].

Por su parte, la cuerda L , que se corresponde con la distancia entre los apoyos, es ajustable según la siguiente expresión:

$$L = (16 \pm 1) \bar{h} \quad (5.2)$$

Donde \bar{h} es el espesor medio del conjunto de especímenes y, en el caso teórico, se cumple que $\bar{h} = h$, y por tanto:

$$L = 64mm \quad (5.3)$$

Una vez revisada la normativa pertinente se modela el espécimen, resultando en una geoemtría como la mostrada en la figura 5.6. Nótese que a esta geometría habrá que realizarle un vaciado con el programa SpaceClaim y el interior se sustituirá por el patrón de llenado en cuestión. El vaciado se realizará hacia el interior, manteniendo las paredes exteriores y con ellas las restricciones de la geometría. Las paredes tendrán un espesor de 1mm como ya se indicó anteriormente.

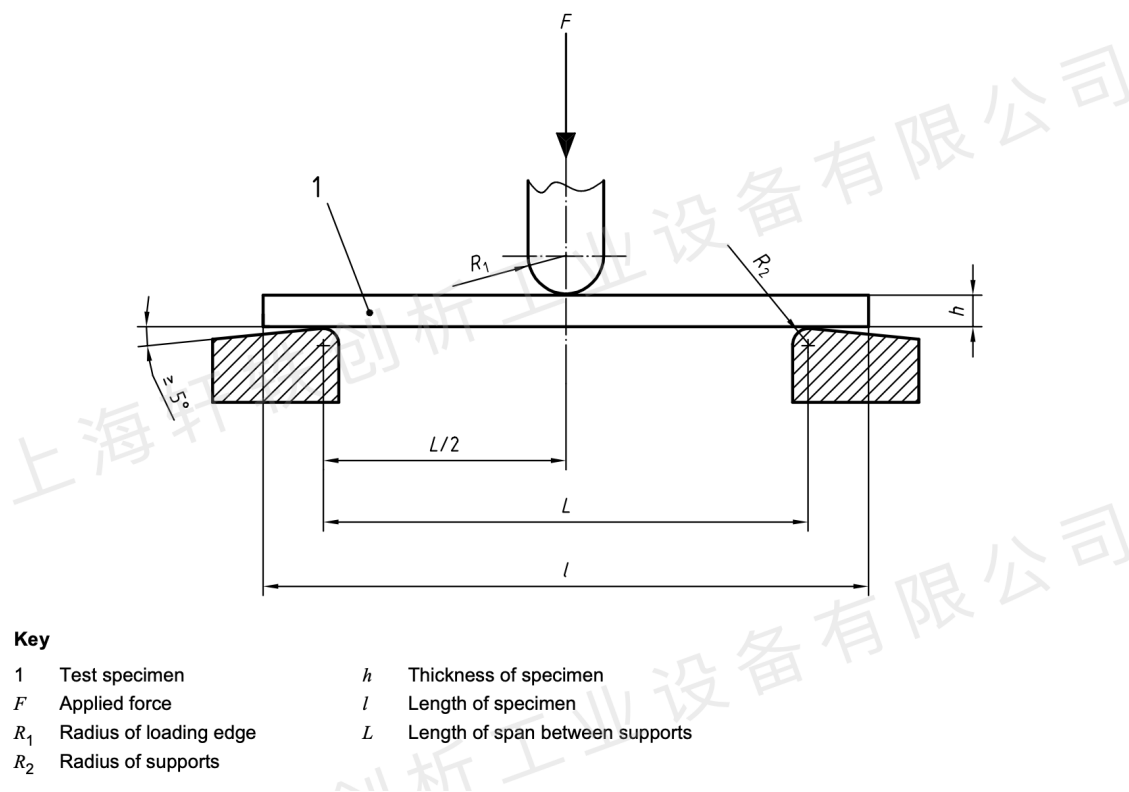
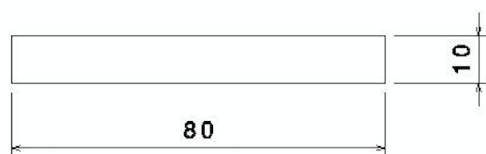
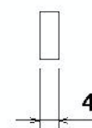


Figura 5.5 Esquema del ensayo a flexión a 3 puntos [39].

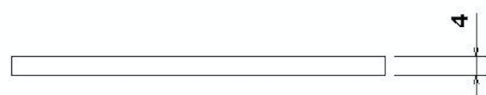
Front view



Left view



Top view



Isometric view

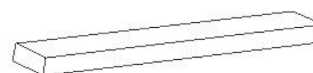


Figura 5.6 Geometría del espécimen a flexión (medidas en mm).

5.3 Normativa aplicable al ensayo modal.

Para la realización de este estudio hemos seguido el procedimiento indicado por el libro "Energy harvesting technologies" [28], que realizaba el ensayo modal de una estructura de tipo viga en voladizo con masa puntual en su extremo libre.

5.3.1 Espécimen.

En dicho texto, la estructura en voladizo se diseña de modo que verifique las aproximaciones de Rayleigh-Ritz para una viga en voladizo de masa uniformemente distribuida, que soporta una masa puntual en su extremo libre y que, es sometida a vibración transversal. Dicha estructura está constituida por dos capas de material piezocerámico PZT-5A opuestamente polarizadas, y unidas a una subestructura de latón con forma de lámina también (veáanse las figuras 5.7 y 5.8).

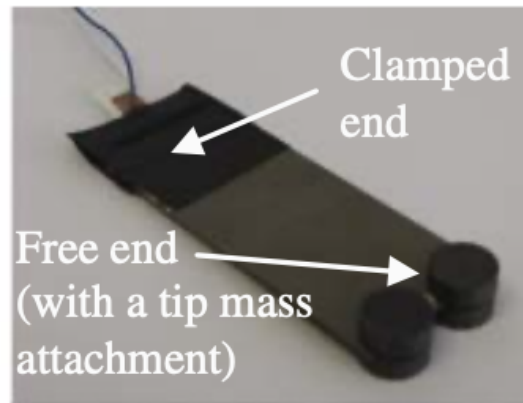


Figura 5.7 Vista detallada de la estructura ensayada en [28].

Geometric Parameters	Piezoceramic	Substructure
Length, L (mm)	50.8	50.8
Width, b (mm)	31.8	31.8
Thickness, h (mm)	0.26 (each)	0.14
Tip mass, M_t (kg)		0.012
Material Parameters	Piezoceramic (PZT-5A)	Substructure (Brass)
Mass density, ρ (kg/m ³)	7800	9000
Young's modulus, Y (GPa)	66	105
Piezo. constant, d_{31} (pm/V)	-190	—
Permittivity, ϵ_{33}^S (nF/m)	$1500\epsilon_0$	—

Figura 5.8 Caracterización de la estructura ensayada en [28].

5.3.2 Procedimiento y maquinaria de ensayo.

El procedimiento de ensayo consiste en la excitación de la viga en voladizo con una curva sinusoidal generado por un LDS shaker electromagnético. La aceleración base del recolector se mide con un acelerómetro de baja masa (PCB U352C22) y su respuesta en velocidad

en el extremo libre se mide con un vibrométero láser (Polytec OFV303 laser sensor head, OFV3001 controller).

El modo de vibración obtenido por [28] parece estar entorno a los 45.6 Hz y resulta ser el único modo de vibración en un amplio rango de frecuencias y el que mayor interés tiene debido a su mayor flexibilidad.

5.3.3 Condicionamiento.

De acuerdo a las normas anteriores, las condiciones de temperatura y humedad en las que se realiza el ensayo serán las mismas que las empleadas para acondicionar el espécimen.

5.3.4 Adaptación del ensayo.

A continuación se llevará a cabo un análisis similar al desarrollado en [22] para determinar la validez del comportamiento de una subestructura de PLA en lugar de la propuesta por [28], de latón. Para ello habrá que estudiar de manera separada el comportamiento de la subestructura y el PZT, pues éste aporta al conjunto una mayor rigidez. Se plantea un análisis modal y la posterior comparación del valor obtenido para el primer modo de vibración de las subestructuras de latón y PLA.

En primer lugar se plantea el estudio analítico del problema de “viga en voladizo”. Se parte por tanto de la ecuación:

$$M\ddot{u} + K\dot{u} = 0 \quad (5.4)$$

Siendo M la matriz de masas, K la de rigideces, y el vector u la incógnita (con tantas componentes como grados de libertad). La anterior ecuación tiene como solución ecuaciones armónicas del tipo:

$$u(x,t) = U(x) \sin(\omega t + \phi) \quad (5.5)$$

Donde U(x) es la amplitud máxima, ω la frecuencia del movimiento y ϕ el desfase. Que puede expresarse como:

$$(K - \omega_n^2 M) U(x) = 0 \quad (5.6)$$

De la que puede extraerse que los autovalores del problema serán las frecuencias naturales asociadas a cada modo de vibración, mientras que los autovectores representarán los diferentes modos. Como bien indicaba [22], al ser el problema que pretende analizarse (viga en voladizo) de un solo grado de libertad, la ecuación puede reescribirse del siguiente modo:

$$(k_i - \omega_n^2 m_i) U(x) = 0 \quad (5.7)$$

Siendo:

- Rigidez del sistema, k_i :

$$k_i = \frac{3EI}{L^3} \quad (5.8)$$

- Frecuencia natural asociada al grado de libertad considerado, ω_{n_i} :

$$\omega_{n_i} = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}} \quad (5.9)$$

- Masa movilizada, m_i :

$$m_i = \frac{33}{140} \rho b h L + M_t \quad (5.10)$$

Donde M_t , es la masa puntual en el extremo, que en este análisis toma u valor de 0.012 kg (véase la figura 5.8).

- Desplazamiento vertical del extremo libre, u_i .

Una vez se tienen definidos estos parámetros, resta expresar la función de transmisión:

$$TR = D \cdot \sqrt{1 + 4\zeta^2 \beta^2} \quad (5.11)$$

$$D = \frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \quad (5.12)$$

$$\beta = \frac{\omega_n}{\omega} \quad (5.13)$$

$$\zeta = 0.05 = \text{Valor supuesto del coeficiente de amortiguamiento} \quad (5.14)$$

Para poder validar el uso de PLA en sustitución al latón, las funciones de transmisión de ambos materiales deben ser razonablemente parecidas. Es decir, se pretende modificar el espécimen fabricado de PLA, con el fin de asemejar su función de transmisión a la del latón.

Tal y como calculó [22] para el ABS, la mayor diferencia entre ambas funciones de transmisión consiste en un desplazamiento en el eje de la frecuencia (véase la figura 5.9), debida a la diferencia de masa movilizada y resistencia de ambos materiales.

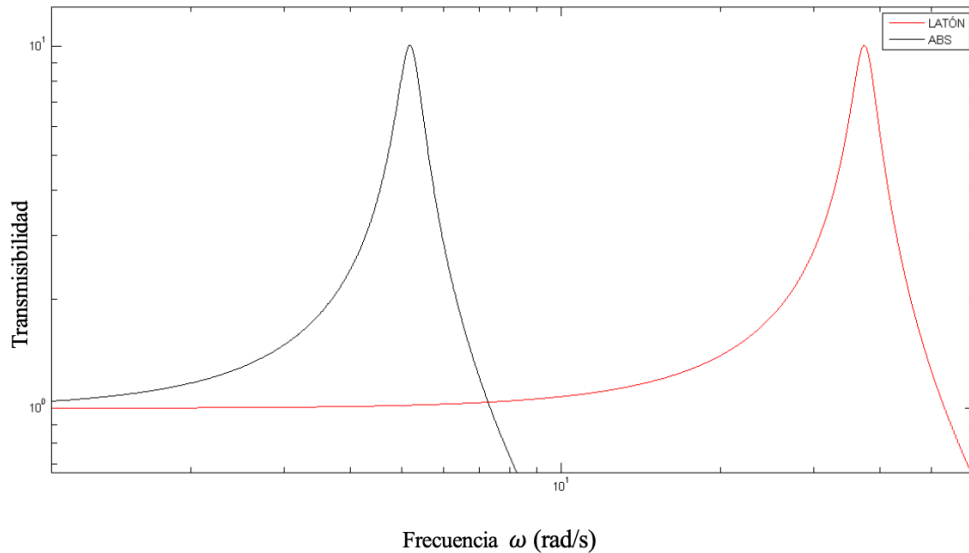


Figura 5.9 Comparación de las funciones de transmisión obtenidas para una viga de latón y ABS [22].

El siguiente paso será por tanto, atenuar dichas diferencias. En nuestro caso, únicamente se igualarán las resistencias, pues la masa movilizada diferirá una cantidad despreciable

del valor obtenido para el sistema con viga de latón. Las dimensiones del nuevo espécimen vienen determinadas por las ecuaciones 5.15-5.16.

$$\frac{k_{PLA}}{k} = 1 = \frac{\frac{3E_{PLA}I_{PLA}}{L^3}}{\frac{3EI}{L^3}} \rightarrow \frac{E_{PLA}bh_{PLA}^3}{12} = \frac{Ebh^3}{12} \quad (5.15)$$

$$h_{PLA} = h \sqrt[3]{\frac{E}{E_{PLA}}} \quad (5.16)$$

Introduciendo en la ecuación 5.16 el valor de los módulos de Young del latón y el PLA, se obtiene que una relación entre los espesores de ambos especímenes. En concreto el valor obtenido es el dado por 5.17:

$$h_{PLA} \simeq 3,2286 \cdot h \simeq 0,45200mm \quad (5.17)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, hasta es posible estimar teóricamente la frecuencia natural correspondiente al primer modo de vibración. En concreto, se tiene que:

$$k = \frac{3EI}{L^3} = E \cdot \frac{3bh^3}{12 \cdot L^3} \simeq 17,4721 \frac{N}{m} \quad (5.18)$$

$$m = \frac{33}{140} \rho bhL + M_t \simeq 0,01221kg \quad (5.19)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \simeq 6,0197Hz \quad (5.20)$$

Valores que han sido calculados, por supuesto, para el espécimen macizo. Como comprobación se muestran a continuación, en la figura 5.10, los determinados por Pablo Montero Oliva para el ABS, en su TFG con el Prof. Antonio Romero Ordóñez, [22].

MATERIAL	FRECUENCIA NATURAL
LATÓN	5.955 Hz → 37.42 rad/s
ABS	6.022 Hz → 37.83 rad/s
PLA	6.020 Hz → 37.82 rad/s

Figura 5.10 Frecuencias naturales calculadas analíticamente para el latón, ABS y PLA [22].

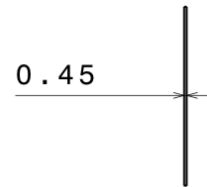
Una vez revisada la bibliografía pertinente y determinadas las dimensiones del espécimen, se modela éste, resultando en una geometría como la mostrada en la figura 5.11. Nótese que a esta geometría habrá que realizarle un vaciado con el programa SpaceClaim y el interior se sustituirá por el patrón de llenado en cuestión. El vaciado se realizará hacia el interior, manteniendo las paredes exteriores y con ellas las restricciones de la geometría. No obstante, este vaciado difiere del realizado en las anteriores geometrías, pues este espécimen tiene una de sus dimensiones significativamente reducida. En concreto el espesor es 0,452mm, como se indicaba anteriormente, por lo que resulta imposible dejar un espesor de pared

de 1mm. Con el fin de solucionarlo, las paredes superior e inferior tendrán un espesor de 0,1mm; mientras que las paredes laterales mantendrán un espesor de 1mm.

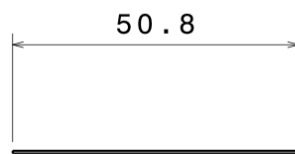
Front view



Left view



Top view



Isometric view

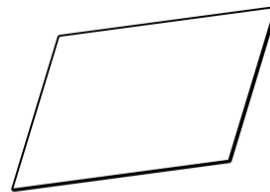


Figura 5.11 Geometría del espécimen sometido a análisis modal (medidas en mm).

6 Caso de estudio

En este capítulo se estudiarán en detalle las diferentes geometrías y se mostrarán y comentarán los resultados de su análisis.

Para la determinación de los casos de estudio, como ya se indicó antes, se siguió el método de Taguchi con 3 parámetros independientes y 3 niveles de cada uno de ellos, dando lugar a un "arreglo ortogonal" frecuentemente empleado y denotado como 3^3 . La tabla ortogonal de Taguchi se determinó empleando el software "Minitab" y se muestra en la imagen 6.1.

Nº ESPÉCIMEN	PATRÓN DE LLENADO	PORCENTAJE DE RELLENO [%]	ÁNGULO DEPOSICIÓN FILAMENTOS [°]
1	REJILLA	10	0
2	REJILLA	30	30
3	REJILLA	50	45
4	HEXAGONAL	10	30
5	HEXAGONAL	30	45
6	HEXAGONAL	50	0
7	TRIANGULAR	10	45
8	TRIANGULAR	30	0
9	TRIANGULAR	50	30

Figura 6.1 Formación ortogonal de Taguchi para 3 factores con 3 niveles.

Ha de destacarse que con el propósito de realizar una posterior comparación, se realiza un análisis adicional para cada uno de los ensayos con un espécimen "macizo", es decir; al que no se le realiza vaciado alguno. Dicho análisis puede encontrarse al final de cada apartado.

6.1 Configuración de la impresión.

A continuación aplicaremos lo anterior al caso de estudio que nos ocupa. Para el modelado de la probeta se han tomado las dimensiones especificadas en las normativas del capítulo 5 y se han modelado los especímenes con "CATIA V5". La geometría creada se ha importado

en un archivo ".stl", de modo que fuese compatible con el software propio de la impresora 3D: "CURA BCN3D" (gratuito y disponible en la página web del fabricante); así como con el software "SpaceClaim" (de "ANSYS").

En cuanto a la geometría modelada, las dimensiones, como ya se ha indicado, son las marcadas por la normativa y se muestran en las imágenes 5.3, 5.6 y 5.11, para los ensayos a tracción y flexión y el análisis modal, respectivamente. Obviamente, estas geometrías son "macizas" y habrá que adaptarlas al caso de estudio que corresponda, vaciándolas y creando una estructura interna.

Una vez, se está trabajando con el software "CURA BCN3D", deben elegirse diversos parámetros.

- Número de estrusores. El software permite la posibilidad de realizar la deposición con dos boquillas diferentes, ésta es una opción recurrente cuando se desea una impresión multimaterial. En este caso, obviaremos dicha posibilidad y emplearemos una única tobera.
- Orientación del espécimen en la impresora. Para este estudio, y siguiendo las recomendaciones de la bibliografía estudiada, se empleará una orientación "Flat". Es decir, la cara de mayor área será la que sirva de base para la impresión y las capas se depositarán en la dirección normal de ésta.
- Porcentaje de llenado. Ya se indicaba anteriormente que éste sería una de los parámetros que estudiaríamos en nuestro análisis multivariable. Siguiendo con la decisión anteriormente tomada de minimizar el número de experimentos, se evaluarán únicamente 3 valores del porcentaje de llenado (y también del resto de variables), a saber: 10 %, 30 % y 50 %.
- Patrón de llenado. Nuevamente se compararán los resultados de 3 geometrías internas:
 - "Grid" o Rejilla. El patrón consiste en la deposición de filamentos constituyendo una rejilla con "huecos" perfectamente cuadrados. La disposición de los filamentos es tal que, en cada capa, los filamentos se colocan sobre los de la de la capa previa, siendo por tanto, orientación y posición fijos y coincidentes en todas las capas.
 - "Hexagonal". Es la variante disponible en el software a la disposición de los filamentos de forma "honeycomb" o panel de abeja. En ella los filamentos crean intersticios con forma de hexagonos regulares. Nuevamente, al igual que sucedía con la opción "grid", el patrón repite posición y orientación, capa tras capa, de modo que el filamento descansa sobre el de la capa previa.
 - "Tetra". Con esta opción la estructura interna queda constituida por filamentos entrecruzados formando triángulos equiláteros. Nuevamente, al igual que sucedía con la opción "grid", el patrón repite posición y orientación, capa tras capa, de modo que el filamento descansa sobre el de la capa previa.

La elección de estas geometrías y no otras, se debe a su disponibilidad en el módulo "SpaceClaim" de "ANSYS", éste permite una fácil e intuitiva manipulación de la geometría de estudio y resulta particularmente interesante en este caso, pues dispone de herramientas específicas para la recreación de estructuras internas fabricadas con impresión 3D. Permite también la creación de

patrones personalizados por el usuario, de utilidad si quisiera ahondarse en la influencia de estos. Cabe destacar que no pueden modelarse con este software, al menos de forma sencilla, estructuras internas específicas para la geometría a trabajar, es decir, que se "adapten" y "modifiquen" para acomodarse a ésta. Este sería el caso de la opción de patrón concéntrico, frecuentemente disponible en impresoras 3D, y consistente en filamentos que se depositan siguiendo el perímetro del espécimen y adentrándose cada vez más en su interior, imitando una geometría "concéntrica". Tampoco son accesibles aquellos patrones en los que la posición y/u orientación del filamento se altera según la capa, de modo que, los filamentos pueden no descansar sobre los de la capa anterior, un caso frecuente de esta metodología es el llamado "lineal".

- **Espesor de capas.** El software no permite elegir los valores que se deseen, siguiendo la bibliografía y teniendo en cuenta que, valores reducidos de este parámetro suelen mejorar las propiedades mecánicas de la pieza (a costa de un aumento del tiempo de impresión), se tomará un valor de 1mm. Cabe resaltar que este valor puede considerarse ligeramente superior al encontrado como óptimo por otros autores (desde 0,2 hasta 0,8mm), pero, por simplicidad y para que el software permita realizar los cálculos necesarios sin elevado coste de tiempo, se considerará el caso en que el espesor de capa y el diámetro del filamento son aproximadamente similares ($\sim 1\text{mm}$). Sería interesante realizar un estudio posterior variando el valor de este parámetro, sin embargo; ha de destacarse que (según la bibliografía consultada) habría que tener en cuenta ciertos aspectos de una mayor complejidad técnica como son: temperatura del filamento en la extrusión, boquilla empleada para la extrusión y efectos relacionados con la nucleación que influyen en la cohesión de los filamentos entre sí.
- **Ángulo de deposición del filamento** (usualmente llamado "raster angle"). Para conseguir una orientación concreta del filamento respecto del eje longitudinal del espécimen, giraremos la probeta, de modo que se consiga formar un ángulo de 0°, 30° y 45° entre éste y el eje X de la máquina.

Una vez, ajustados los parámetros según se desee, el programa exportaría un archivo "g-code" en el que se registran todos los ajustes de impresión.

6.2 Observaciones sobre el análisis estructural.

Para el estudio estructural, se empleará el software gratuito para estudiantes facilitado por "ANSYS". Para ello se importará la geometría desarrollada en "CATIA V5", en un formato compatible con éste, como es, por ejemplo ".igs".

Para el modelado de la geometría interna de la probeta se hará uso del antes mencionado módulo de "ANSYS": "SpaceClaim". A éste se importará el modelo del espécimen desarrollado en "CATIA v5" como un sólido desarrollado en el módulo "Part design". Tras ello, el software permite la realización de un vaciado, para el cual se ha elegido un espesor de la cáscara (paredes externas del espécimen, "shell" en la mayoría de software) de 1mm, siguiendo las recomendaciones de la bibliografía consultada. Dicho vaciado puede ser completo (el espécimen es completamente hueco) pero, por supuesto, también se permite la selección de varios patrones de relleno y densidades de ocupación, imitando el resultado

de un proceso de impresión 3D. En el caso que nos ocupa se seleccionarán para el estudio: grid, hexagonal y tetra; así como densidades: 10 %, 30 % y 50 %.

Como comentario respecto al espesor de la pared exterior, es reseñable que, según la bibliografía consultada, éste no parece tener una influencia destacable frente a los parámetros elegidos como "parámetros de diseño" (densidad de relleno, ángulo de deposición de filamentos y patrón de llenado). Obviamente, la elección de esta longitud tiene repercusión en la densidad total de la probeta (pero es independiente a la densidad del patrón de llenado elegido). En vista de esto vamos a tomarlo como un valor fijo y realizaremos los estudios, no considerándolo.

El software "SpaceClaim", tiene por supuesto sus limitaciones, por lo que en ocasiones un determinado porcentaje de relleno, un patrón concreto de llenado y un valor del espesor del cordón, serán incompatibles, teniendo que modificarse ligeramente alguno de los valores seleccionados para el espesor. Las variaciones son, sin embargo, despreciables (del orden de las centésimas de mm).

6.3 Observaciones sobre la geometría

Con respecto a los diferentes especímenes, determinados por la tabla de Taguchi, deben comentarse algunos aspectos relevantes de la geometría. En relación al patrón elegido y su interacción con el ángulo de deposición del filamento, cabe destacar que inicialmente se consideró emplear un ángulo de 60° (en lugar de 45°), sin embargo; por la definición de los patrones hexagonales y triangular (recuérdese que eran tales que formaban intersticios con forma de hexágonos regulares y triángulos equiláteros, respectivamente), se da lugar a coincidencias en la orientación de la estructura interna. Así pues:

- Para el patrón hexagonal será coincidente la orientación asociada a ángulos de deposición de 0° y 60°.
- Para el patrón triangular será coincidente la orientación asociada a ángulos de deposición de 0° y 60°.

Es por ello, que se decide evitar el valor de 60° para obtener unos datos claramente interpretables. Dicho valor generaría, además, una coincidencia peculiar con el patrón de rejilla, pues por formar los intersticios entre los filamentos cuadrados perfectos, son equivalentes las orientaciones asociadas a los valores de 30° y 60° para el ángulo de deposición.

Es por ello, que se decide emplear en lugar del problemático valor de 60°, el valor de 45°, de uso extendido en la industria.

Cabe destacar que, para todas las geometrías, la orientación de 0° se corresponde con aquella en la cual alguno de los filamentos que conforman el patrón, se alinea con la dirección longitudinal del espécimen. Por su parte, para los patrones hexagonal y triangular, la orientación asociada al valor de 30° sitúa los filamentos en perpendicular a la dirección longitudinal del espécimen.

6.4 Análisis a tracción.

6.4.1 Geometría

Pueden encontrarse las dimensiones del espécimen en la figura 5.1 y el porqué de su elección en el capítulo 5, en la sección correspondiente a este ensayo.

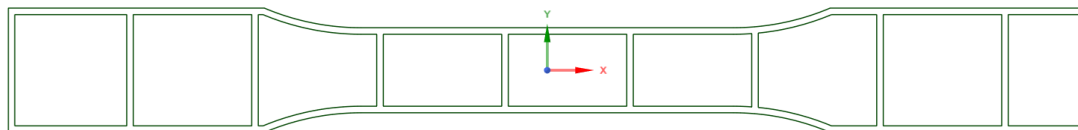


Figura 6.2 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10% y ángulo de deposición de 0.

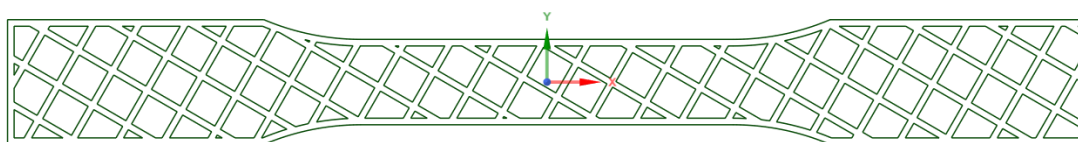


Figura 6.3 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30% y ángulo de deposición de 30.

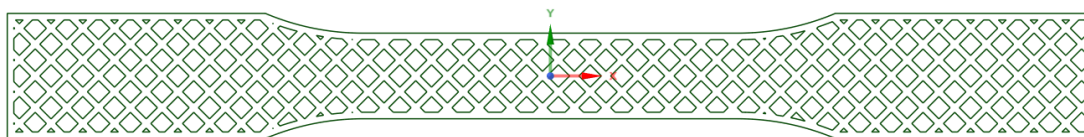


Figura 6.4 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50% y ángulo de deposición de 45.

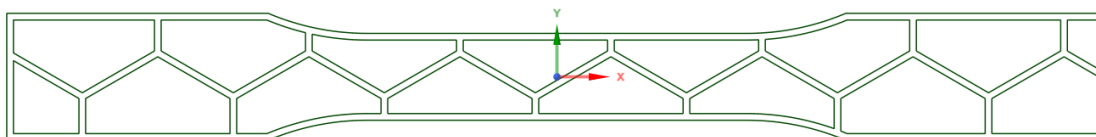


Figura 6.5 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10% y ángulo de deposición de 30.

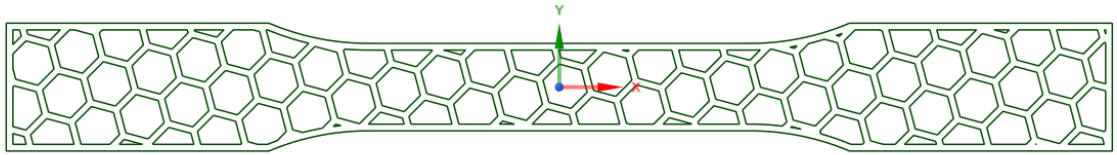


Figura 6.6 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

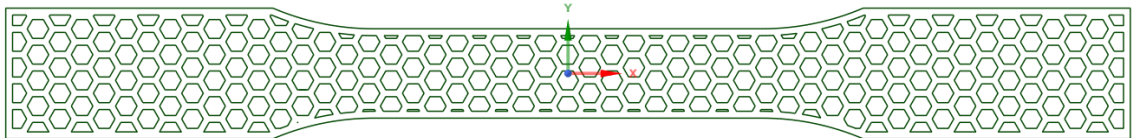


Figura 6.7 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0.

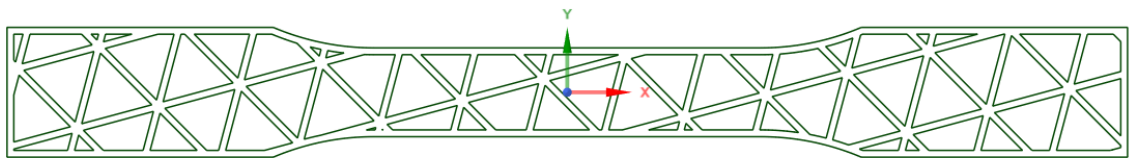


Figura 6.8 Espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45.

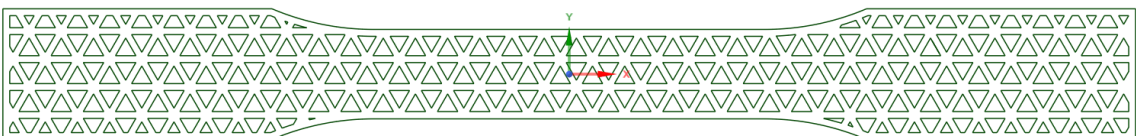


Figura 6.9 Espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0.

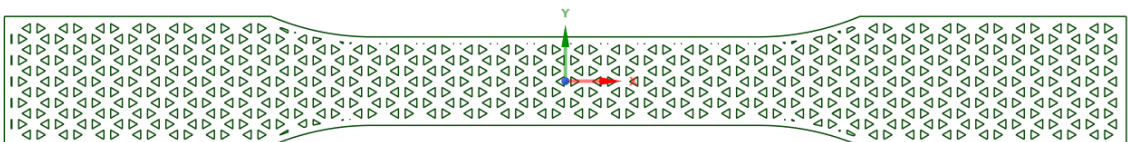


Figura 6.10 Espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30.

6.4.2 Resultados del análisis.

Cabe destacar que el sistema modelado, trata de emular las condiciones reales de ensayo, sin embargo; con el objetivo de simplificar el cálculo se han hecho algunas aproximaciones razonadas.

- Se realiza en ANSYS un análisis estático. (No se tendrán en cuenta las velocidades de aplicación de la carga del ensayo real).
- La carga aplicada se modela como una presión de 1Pa aplicada en la superficie de uno de los extremos, esto es un superficie de 19x7 mm. Obviándose por tanto, la zona en contacto con las mordazas y los posibles deslizamientos entre éstas y el propio espécimen.
- En el otro extremo, se aplica para toda su superficie (cara de 19x7 mm), la condición de empotramiento. Obviándose por tanto, la zona en contacto con las mordazas y los posibles deslizamientos entre éstas y el propio espécimen.
- El desplazamiento mostrado en los resultados es el máximo en la dirección longitudinal del espécimen (dirección de movimiento relativo de las mordazas).

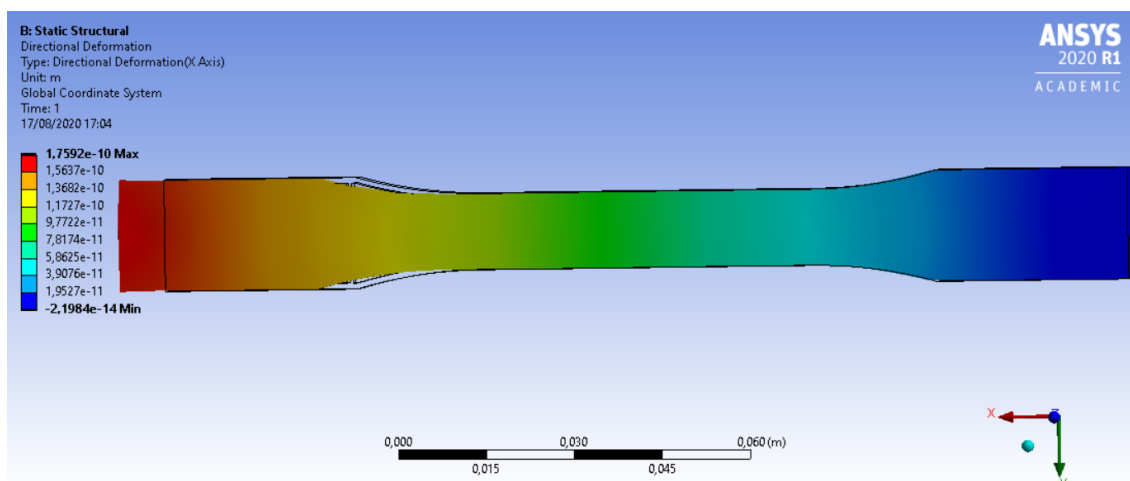


Figura 6.11 Resultado a tracción del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0.

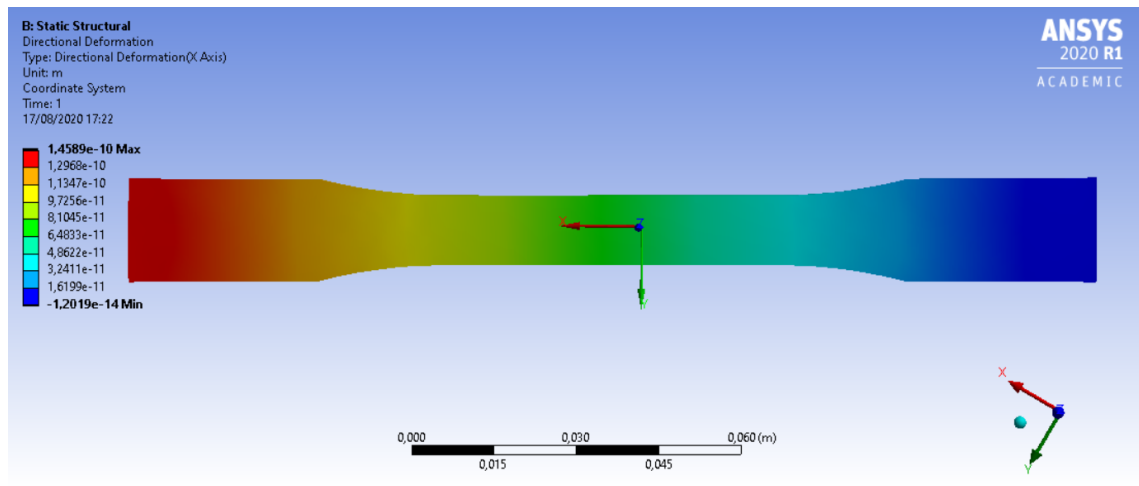


Figura 6.12 Resultado a tracción del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30.

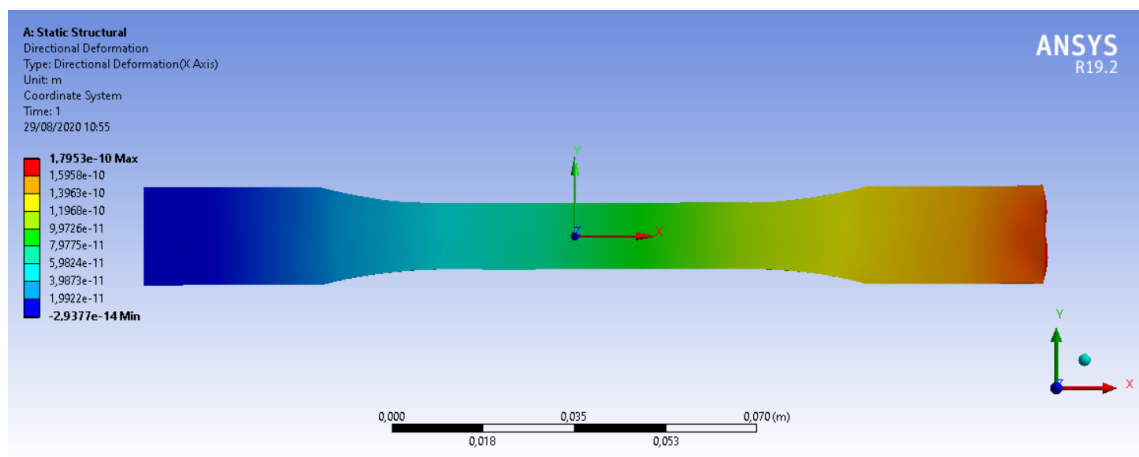


Figura 6.13 Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30.

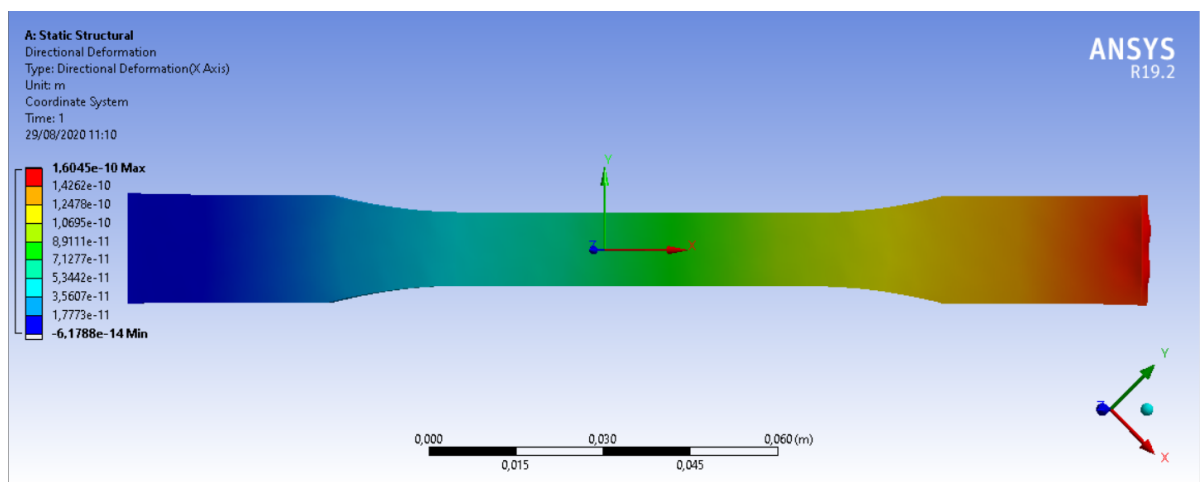


Figura 6.14 Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

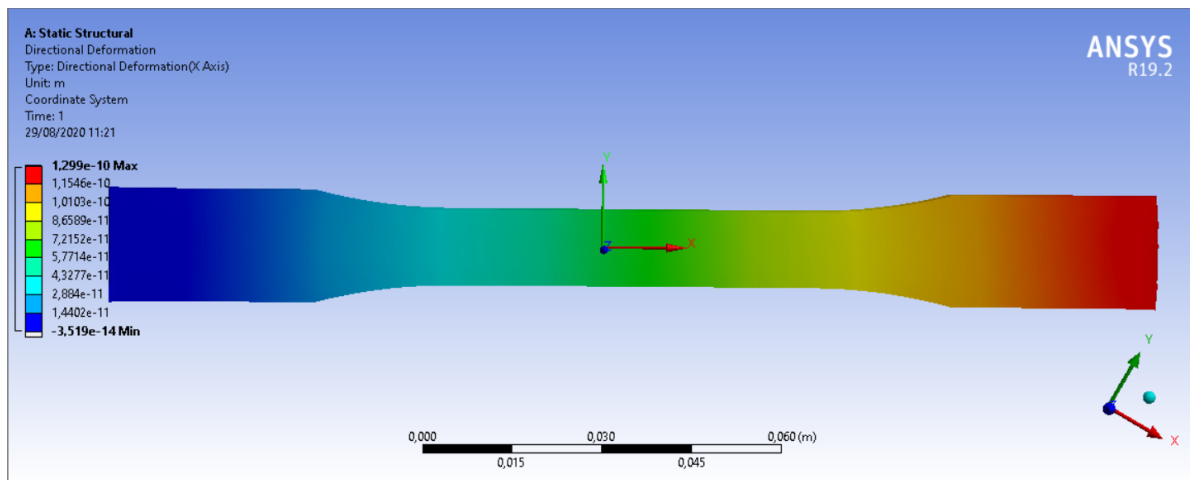


Figura 6.15 Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0.

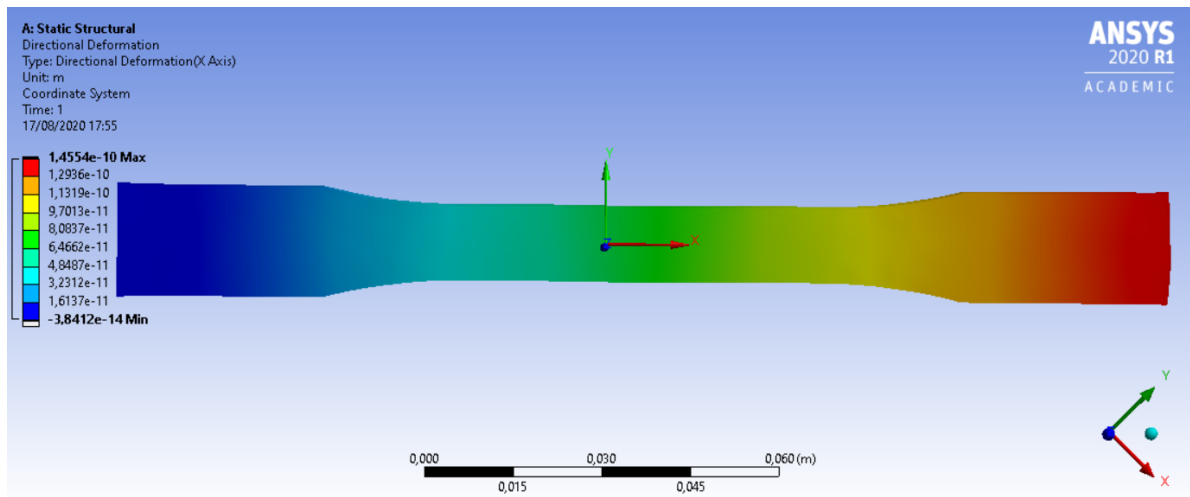


Figura 6.16 Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45.

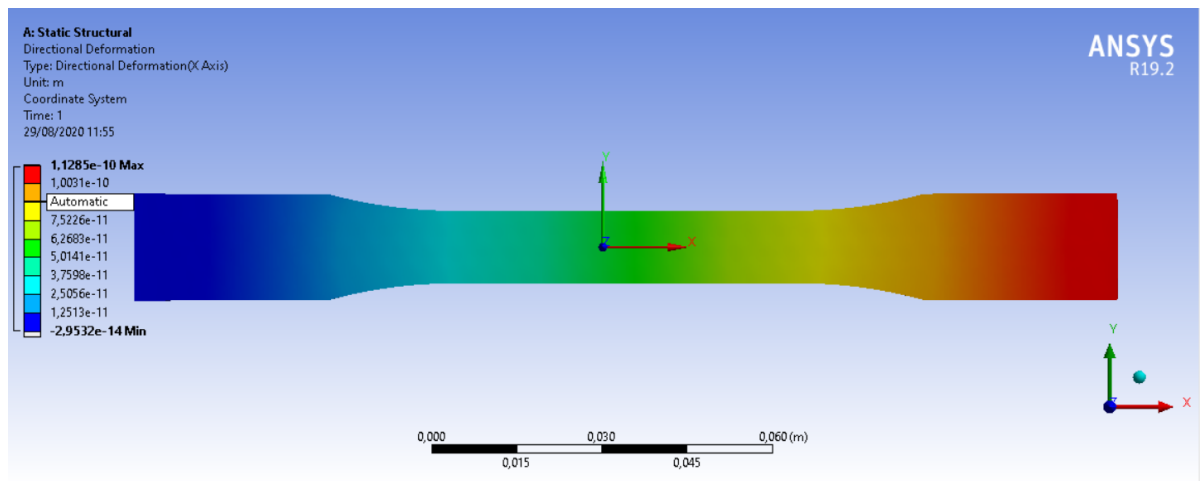


Figura 6.17 Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0.

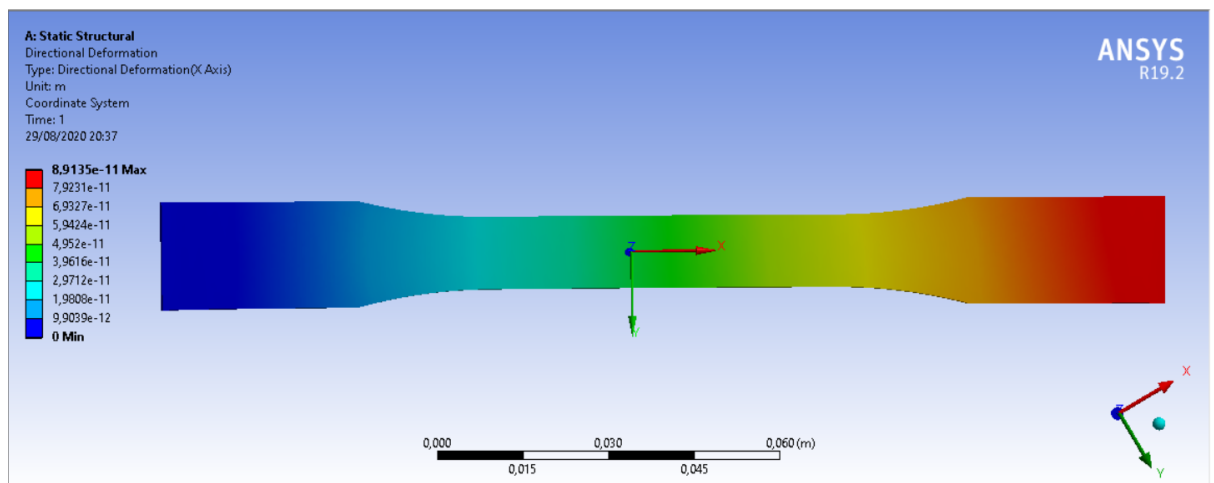


Figura 6.18 Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30.

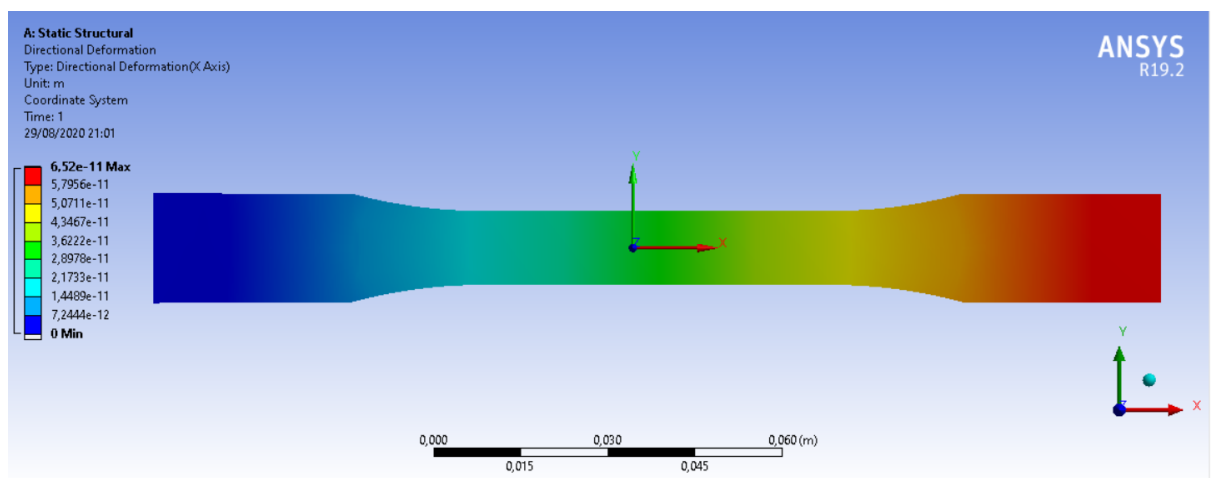


Figura 6.19 Resultado a tracción del espécimen macizo.

6.4.3 Análisis de los resultados presentados.

En la figura 6.20 se resumen los valores obtenidos en el apartado 6.6.3. En la última fila de la tabla se presenta el caso de espécimen macizo (obviamente para este caso no tiene sentido definir ni patrón, ni ángulo de llenado).

Es observable que el mayor valor del módulo elástico a tracción, así como de la rigidez, se alcanza con el espécimen macizo; en vista de lo cual, podría decirse que con este análisis se pretende determinar que condiciones de impresión aproximan más eficazmente el comportamiento a tracción de los especímenes vaciados al presentado por el espécimen macizo.

ANÁLISIS A TRACCIÓN					
ESPÉCIMEN			MÁX. DESPLAZAMIENTO [m]	RIGIDEZ [N/m]	E_f [Pa]
PATRÓN	DENSIDAD [%]	ÁNGULO [°]			
REJ	10	0	1,7592E-10	7,5603E+05	3,2401E+08
REJ	30	30	1,4890E-10	8,9322E+05	3,8281E+08
REJ	50	45	1,3879E-10	9,5828E+05	4,1069E+08
HEX	10	30	1,7953E-10	7,4082E+05	3,1750E+08
HEX	30	45	1,6045E-10	8,2892E+05	3,5525E+08
HEX	50	0	1,2990E-10	1,0239E+06	4,3880E+08
TRIA	10	45	1,4554E-10	9,1384E+05	3,9164E+08
TRIA	30	0	1,1285E-10	1,1786E+06	5,0510E+08
TRIA	50	30	8,9135E-11	1,4921E+06	6,3948E+08
	100		6,5200E-11	2,0399E+06	8,7423E+08

Figura 6.20 Resultados obtenidos en el ensayo a tracción.

El software "Minitab" permite extraer directamente de los resultados de Taguchi algunas gráficas de interés como son "Valor medio vs los diferentes parámetros" y "Valor de la función Señal-Ruido vs los diferentes parámetros". Se presentan a continuación. Recuérdese que el método de Taguchi y en concreto la función Señal-Ruido podrían entenderse como una medida de la fiabilidad y estabilidad del sistema para el cumplimiento de un determinado objetivo, es decir; que de alguna manera expresan como, mediante el ajuste de ciertos parámetros (los de mayor peso), éstos se superponen a las irreversibilidades del proceso y mejoran el resultado. Recuérdese también que para determinar los óptimos de Taguchi, deben elegirse los valores o niveles de cada factor, que maximicen la S-N.

Teniendo todo ello en cuenta, procedemos a analizar la figura 6.21. En primer lugar debe señalarse que las máximas variaciones de S-N se dan para la densidad y el patrón, siendo ambas considerablemente similares. En concreto la S-N de la densidad es ligeramente superior y la del ángulo de deposición de filamento es la menor de los 3 factores, con una marcada diferencia. En la figura 6.22 puede observarse una comparativa porcentual de los valores máximos para cada factor. En función de esto, podría decirse que:

- Resultan determinantes para el comportamiento a tracción de la pieza, la densidad de relleno y el patrón elegido para la creación del espécimen. Teniendo una mayor

importancia la densidad de relleno.

- La densidad parece mostrar una tendencia casi lineal, presentando para un valor del 50 %, un mayor S-N, y por tanto, siendo (de los casos estudiados) el valor que optimiza el módulo de Young.
- El patrón resulta ser, según el análisis de Taguchi, el segundo factor en "importancia". Presenta valores muy similares del S-N para los patrones hexagonal y de rejilla. El máximo S-N se alcanza para el patrón triangular y destaca respecto a los 2 anteriores por una notable diferencia. En base a esto cabría esperar un mejor comportamiento a tracción si se emplea un patrón triangular.
- El ángulo de deposición del filamento sería el de menor repercusión en la determinación del módulo de Young, según la S-N. El valor que resultaría óptimo es el de 30°, por su parte, el menos favorable sería el ángulo de 45°.

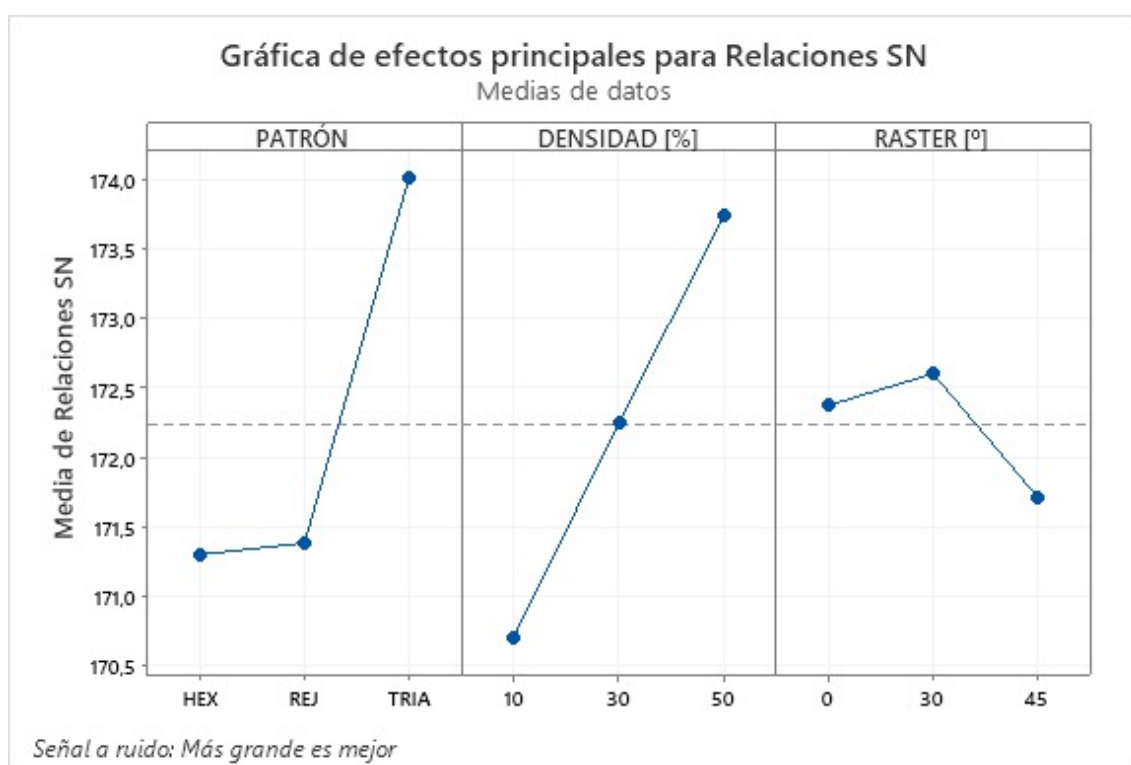


Figura 6.21 Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

ESPÉCIMEN TRACCIÓN	MAX SN	MIN SN	Δ	%
DENSIDAD	173,70	170,70	3,00	45,45
PATRÓN	174,00	171,30	2,70	40,91
ÁNGULO	172,60	171,70	0,90	13,64

Figura 6.22 Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.

A la luz de estos valores de la función SN, la configuración del espécimen que optimizaría su resistencia a tracción, sería: patrón triangular al 50 % de densidad con un ángulo de deposición del filamento de 30°. Casualmente, dicha configuración coincide con la del espécimen N°9, por lo que los datos de su comportamiento ya han sido calculados y por tanto, son conocidos.

Los valores medios del módulo elástico a tracción, obtenidos para cada nivel y factor, pueden verse en la gráfica 6.23.

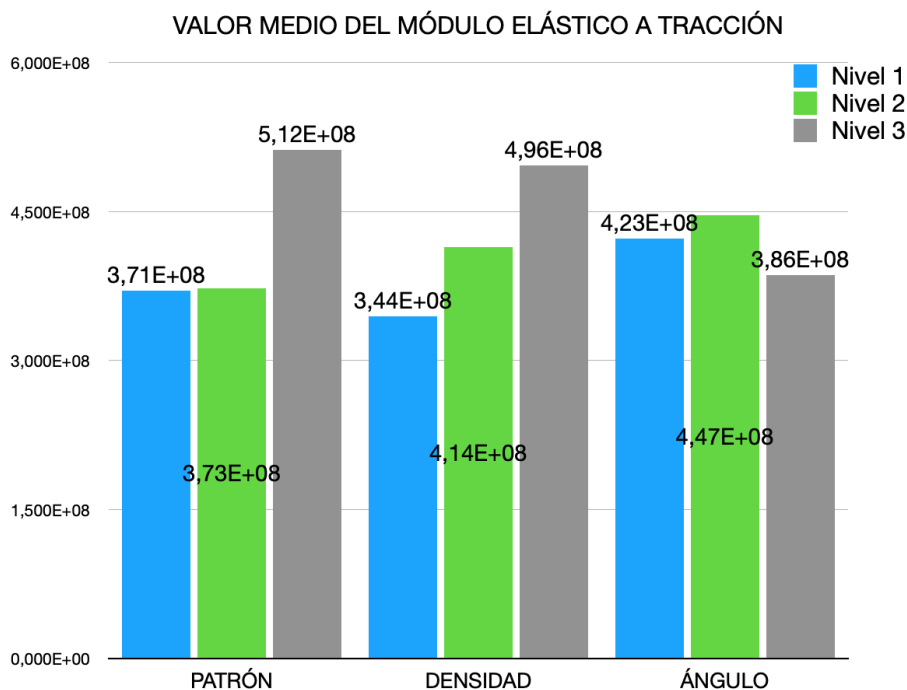


Tabla Tracción

Tabla Análisis Tracción	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
PATRÓN	3,705E+08	3,725E+08	5,121E+08
DENSIDAD	3,444E+08	4,144E+08	4,963E+08
ÁNGULO	4,226E+08	4,466E+08	3,859E+08

Figura 6.23 Evolución del valor medio del módulo elástico (en Pascales) según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

Se realiza a continuación, una comparación entre la geometría estimada como óptima (a efectos de su comportamiento a tracción) y el espécimen macizo.

Tal y como se muestra en la figura 6.24, la geometría determinada como óptima y el espécimen macizo presentan una variación relativa del módulo de Young de entorno al 26,852 %. Con la geometría N°9 se consigue además una reducción del 30,832 % del peso total del espécimen (respecto a la geometría maciza) y consecuentemente de los costes. La variación del módulo de Young entre el espécimen al que se ha realizado el vaciado y el macizo es considerable, por tanto, para determinar si resulta una buena alternativa el empleo de la configuración TRIA-50 %-30° deberán considerarse los resultados mostrados en los próximos apartados.

Comportamiento a tracción

<i>Comparativa Óptimo-Espécimen Macizo</i>	MÓDULO ELÁSTICO [Pa]	RIGIDEZ [N/m]	PESO [kg]	PRECIO [€]
Espécimen Macizo	8,742E+08	2,040E+06	2,321E-02	1,0815
Tria-50%-30°	6,395E+08	1,492E+06	1,605E-02	0,7480
Diferencia porcentual [%]	26,852		30,832	

Figura 6.24 Comparación de los comportamientos a tracción del espécimen macizo y la geometría óptima.

6.5 Análisis a flexión a 3 puntos.

6.5.1 Geometría.

Pueden encontrarse las dimensiones del espécimen en la figura 5.6 y el porqué de su elección en el capítulo 5, en la sección correspondiente a este ensayo.

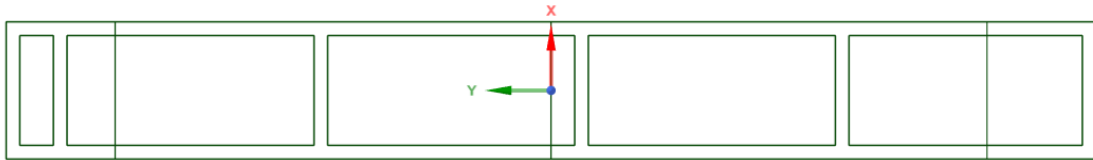


Figura 6.25 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0.

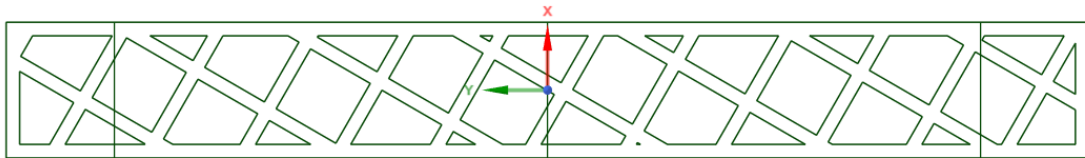


Figura 6.26 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30.

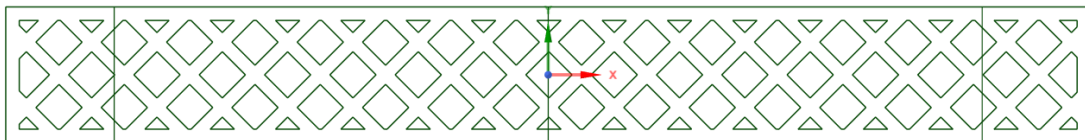


Figura 6.27 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45.

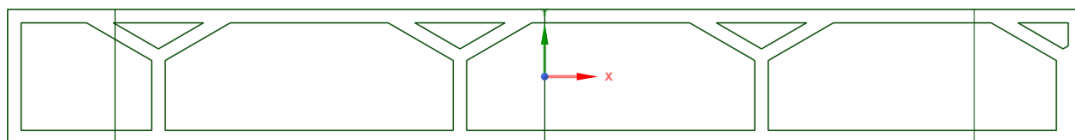


Figura 6.28 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30.

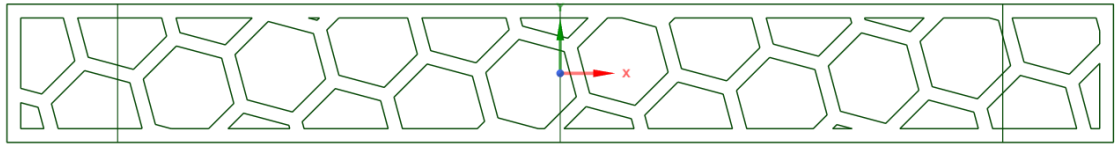


Figura 6.29 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

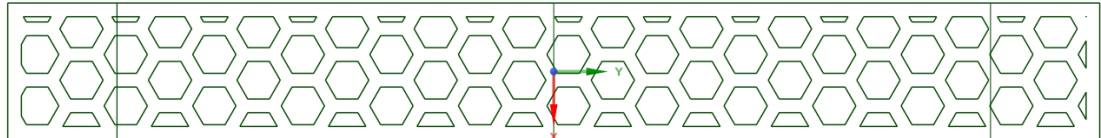


Figura 6.30 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0.

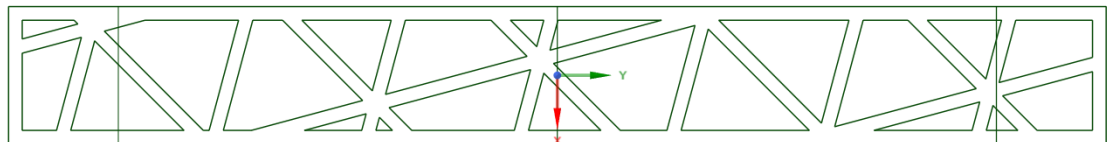


Figura 6.31 Espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45.

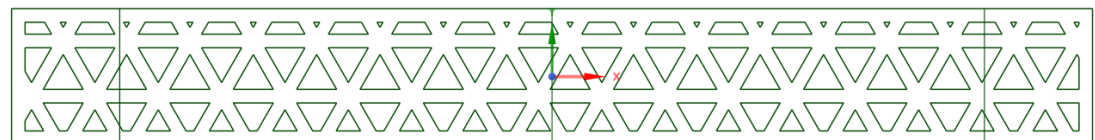


Figura 6.32 Espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0.

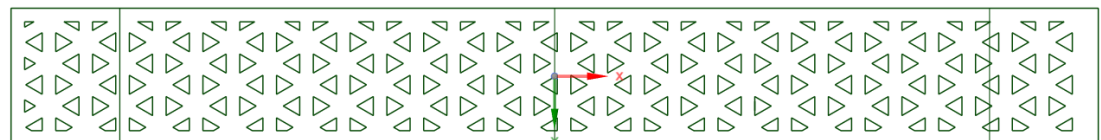


Figura 6.33 Espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30.

6.5.2 Resultados del análisis.

Cabe destacar que el sistema modelado, trata de emular las condiciones reales de ensayo, sin embargo; con el objetivo de simplificar el cálculo se han hecho algunas aproximaciones razonadas.

- Se realiza en ANSYS un análisis estático. (No se tendrán en cuenta las velocidades de aplicación de la carga del ensayo real).
- La carga aplicada se modela como una fuerza distribuida a lo largo de una línea, tendrá un valor de 1N/m y se aplicará en la línea central del espécimen (esto es una longitud de 10mm). Obviándose por tanto, la interacción del espécimen con la zona en contacto del rodillo (resultado del avance de éste).
- De manera similar a como se procedía con la carga, los desplazamientos impedidos también se aplicarán a lo largo de una línea. Ambas zonas (líneas de aplicación) son paralelas a los extremos del espécimen y se sitúan a 8mm de cada uno de ellos.
 - En una de las citadas zonas se restringen todos los desplazamientos.
 - En la zona restante se restringen los desplazamientos en todas las direcciones salvo en la longitudinal (simulando un "apoyo de bolas").
- El desplazamiento mostrado en los resultados es el máximo en la dirección perpendicular al espécimen (dirección de movimiento relativo de los rodillos).

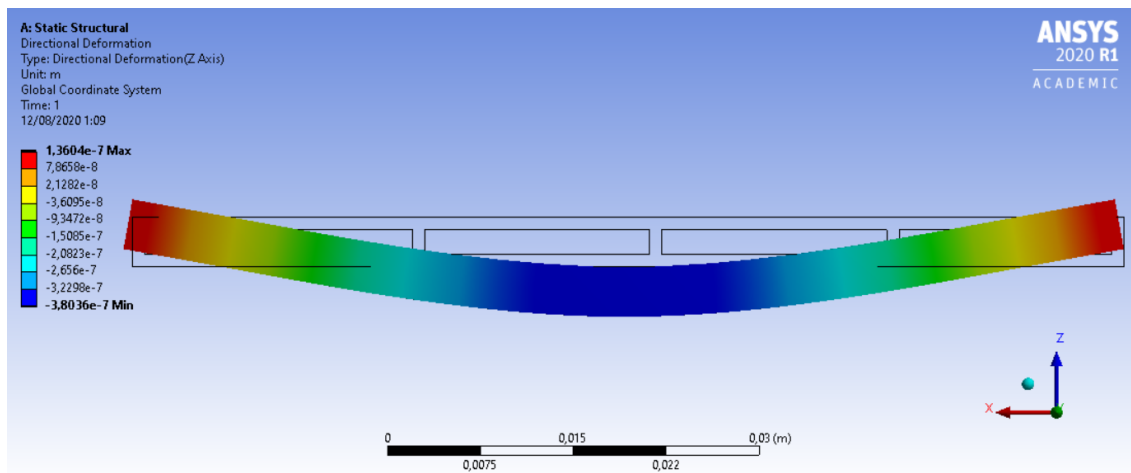


Figura 6.34 Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10% y ángulo de deposición de 0.

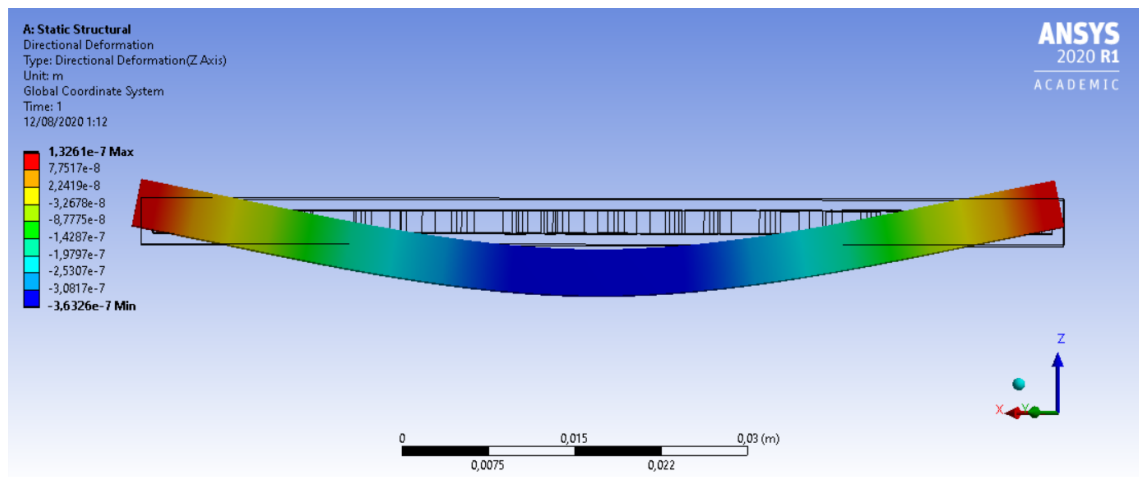


Figura 6.35 Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30.

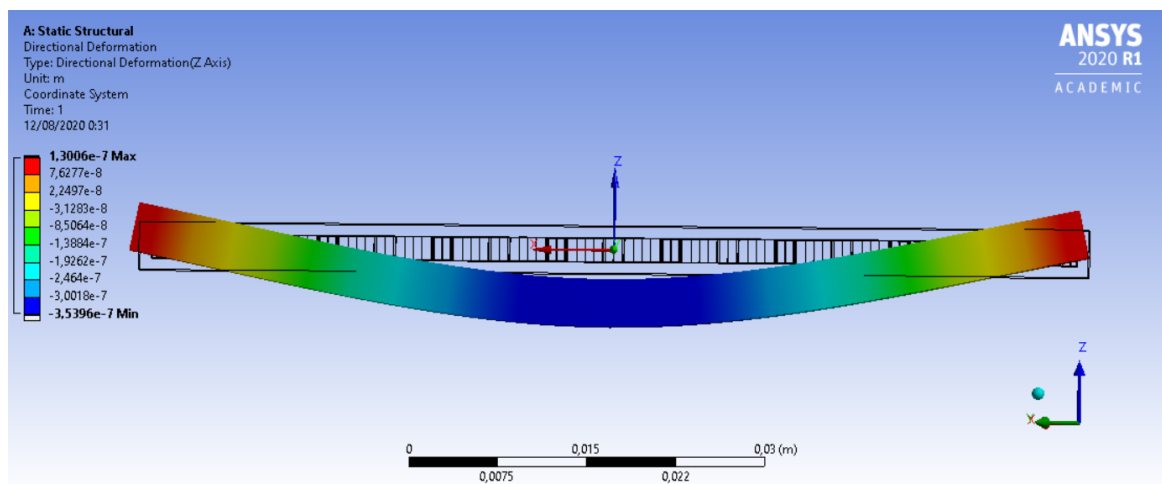


Figura 6.36 Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45.

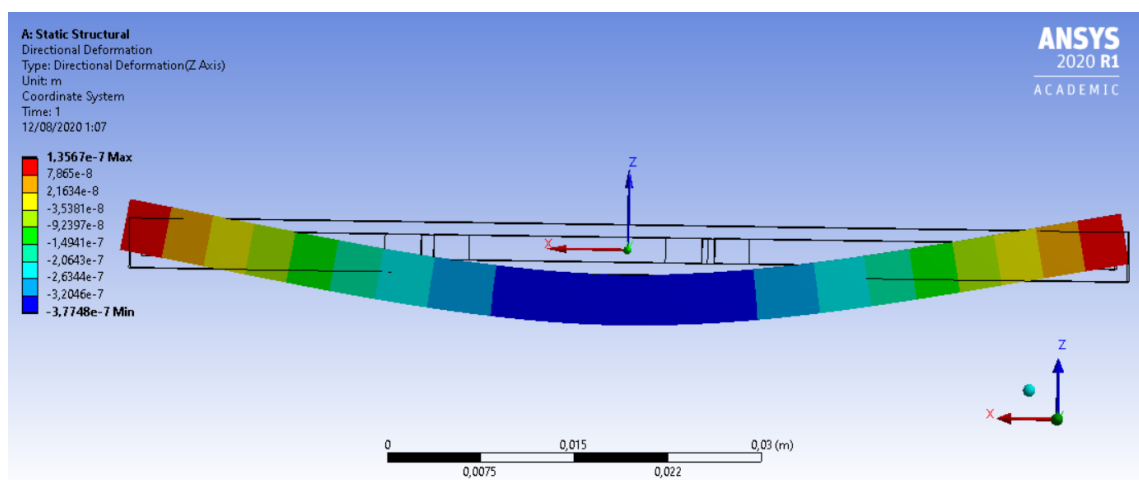


Figura 6.37 Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30.

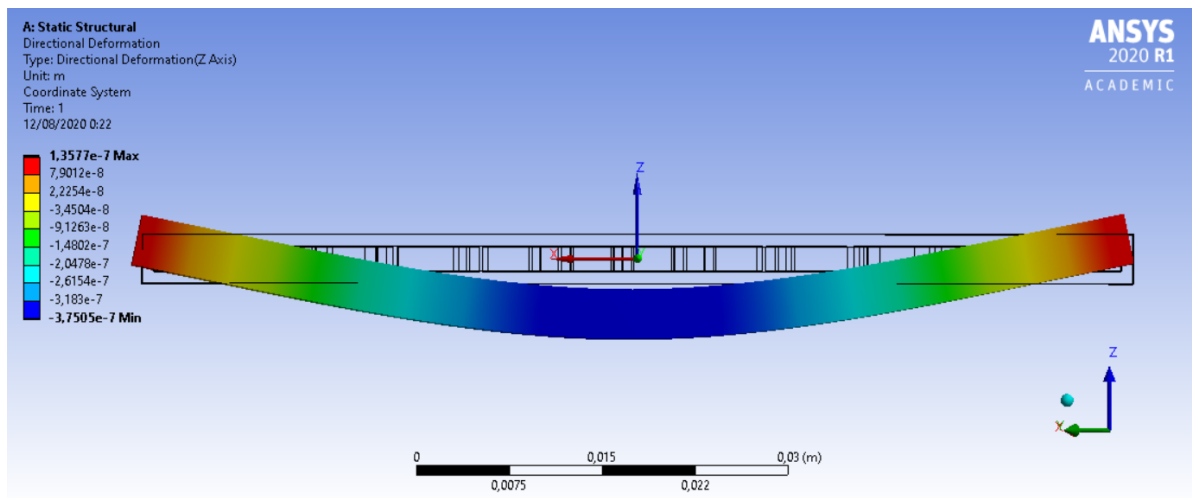


Figura 6.38 Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

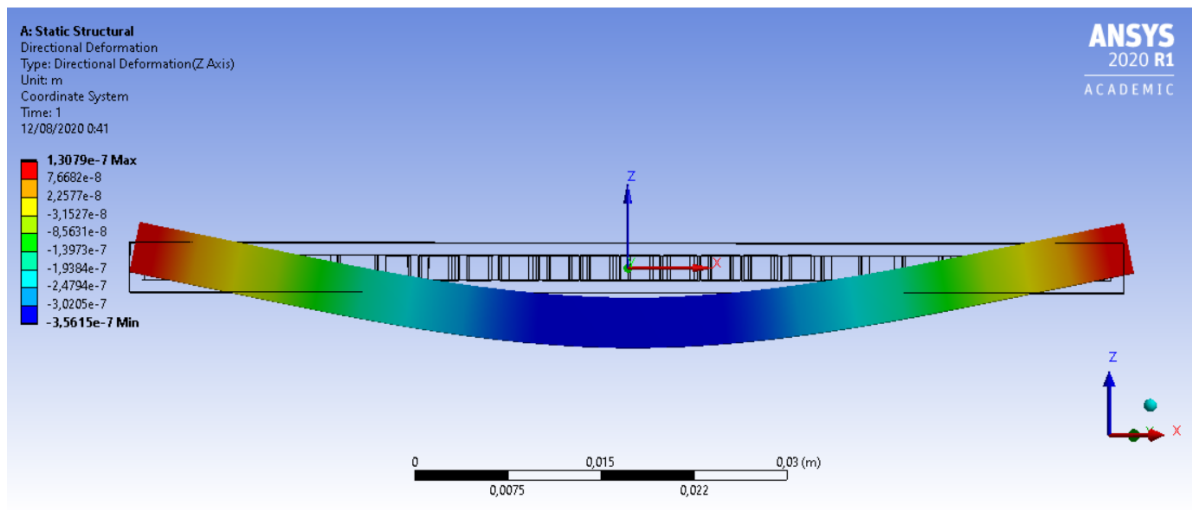


Figura 6.39 Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0.

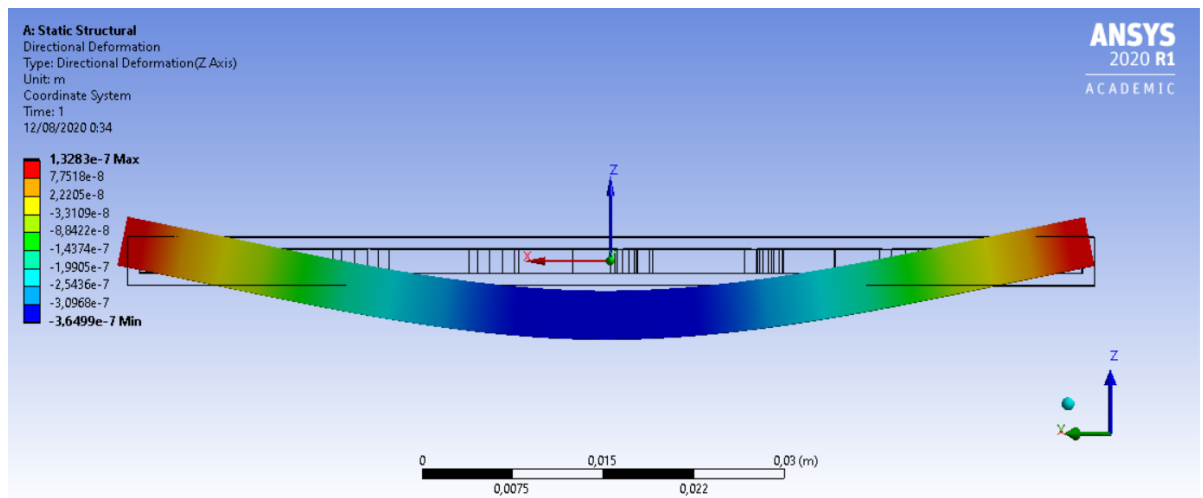


Figura 6.40 Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45.

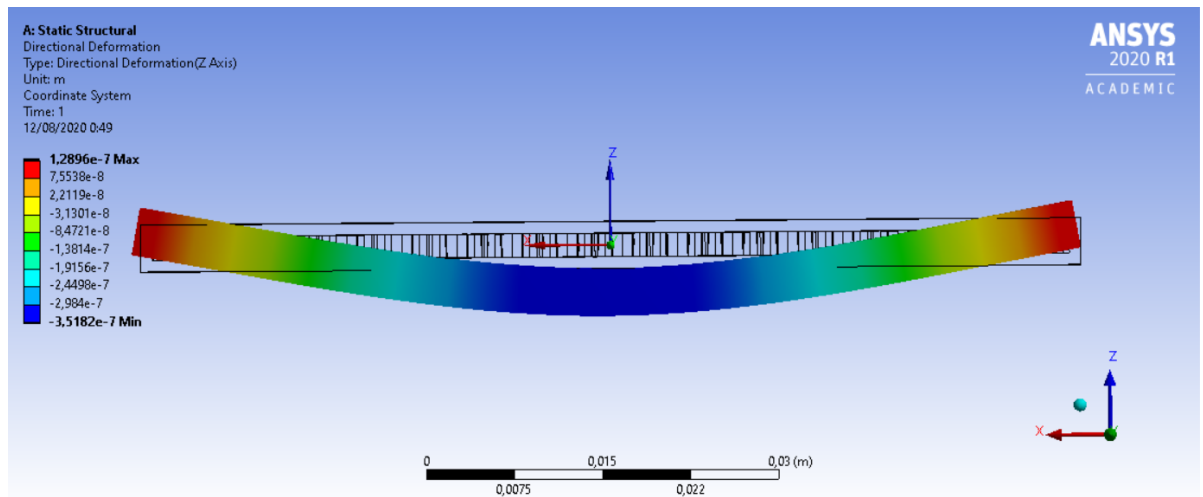


Figura 6.41 Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0.

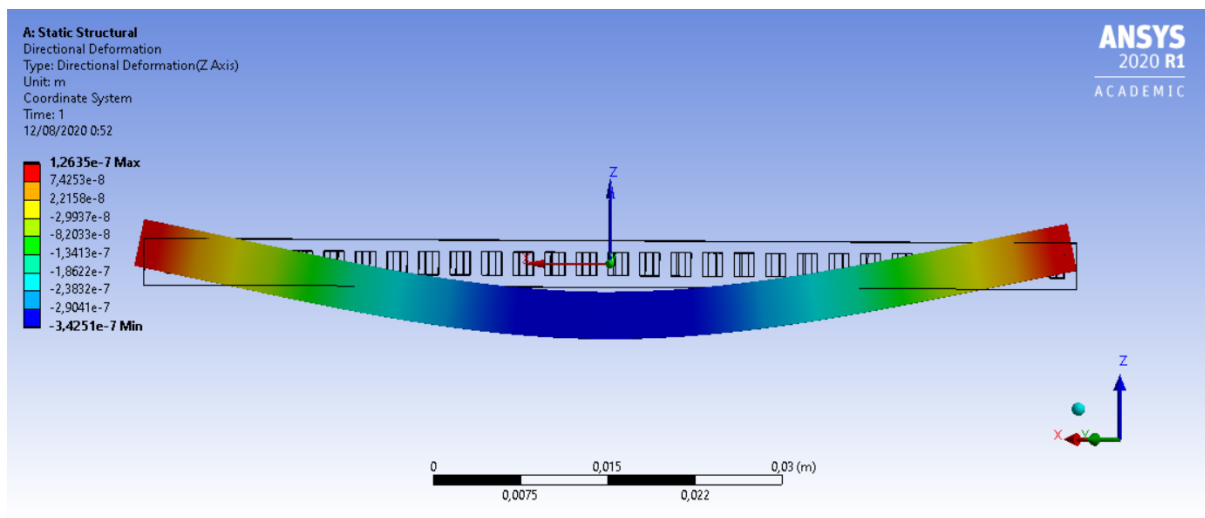


Figura 6.42 Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30.

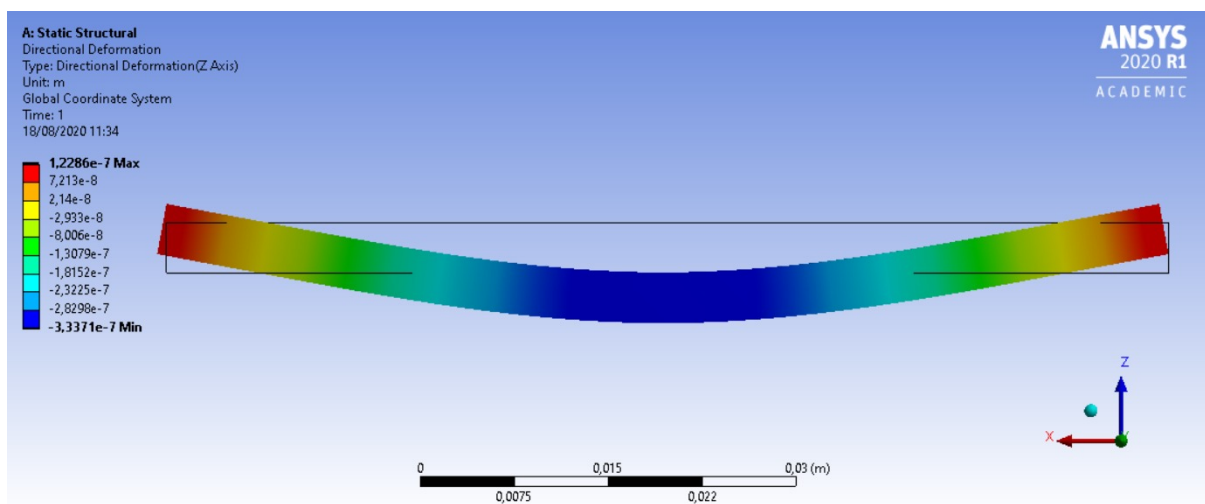


Figura 6.43 Resultado a flexión del espécimen macizo.

6.5.3 Análisis de los resultados presentados.

En la figura 6.44 se resumen los valores obtenidos en el apartado 6.6.3. En la última fila de la tabla se presenta el caso de espécimen macizo (obviamente para este caso no tiene sentido definir ni patrón, ni ángulo de llenado).

ANÁLISIS DE FLEXIÓN A 3 PUNTOS					
ESPÉCIMEN			MÁX. DESPLAZAMIENTO [m]	RIGIDEZ [N/m]	E_f [Pa]
PATRÓN	DENSIDAD [%]	ÁNGULO [°]			
REJ	10	0	3,80E-07	2,63E+04	2,69E+09
REJ	30	30	3,63E-07	2,75E+04	2,82E+09
REJ	50	45	3,54E-07	2,83E+04	2,89E+09
HEX	10	30	3,77E-07	2,65E+04	2,71E+09
HEX	30	45	3,75E-07	2,67E+04	2,73E+09
HEX	50	0	3,56E-07	2,81E+04	2,88E+09
TRIA	10	45	3,65E-07	2,74E+04	2,81E+09
TRIA	30	0	3,52E-07	2,84E+04	2,91E+09
TRIA	50	30	3,43E-07	2,92E+04	2,99E+09
	100		3,34E-07	3,00E+04	3,07E+09

Figura 6.44 Resultados obtenidos en el ensayo a flexión.

El software "Minitab" permite extraer directamente de los resultados de Taguchi algunas gráficas de interés como son "Valor medio vs los diferentes parámetros" y "Valor de la función Señal-Ruido vs los diferentes parámetros". Se presentan a continuación.

Cabe destacar en este punto que al programa "Minitab" se le proporcionaron como valores de salida las rigideces obtenidas para cada espécimen, mostradas en la tabla 6.44. El cálculo de éstas, así como del módulo elástico se ha ejecutado como sigue:

$$Rigidez = \frac{F}{D_{max}} \quad (6.1)$$

Donde F es la fuerza total aplicada sobre el espécimen y D el desplazamiento máximo experimentado por éste. Para el cálculo de la fuerza se ha tenido en cuenta que sobre el espécimen se aplicó una carga de 1N/m a lo largo de la línea central de la probeta (0,01m), lo que resulta en una fuerza total de 0,01N. Por otro lado, según la normativa correspondiente al ensayo de flexión, la tensión y deformación se calculan según las ecuaciones 6.2 y 6.3, respectivamente.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (6.2)$$

$$Rigidez = D_{max} \frac{6h}{L^2} \quad (6.3)$$

En ambas fórmulas, L hace referencia a la distancia entre los apoyos, 64mm; mientras que h y b son las dimensiones del espécimen (véase la figura 5.6). Por último, el valor del módulo elástico puede obtenerse como:

$$E_f = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6.4)$$

Volviendo a la tabla de la figura 6.44, es observable que el menor valor del desplazamiento máximo se alcanza para el caso macizo, consecuentemente, es este espécimen el que alcanza mayores valores de la rigidez y el módulo elástico. Este hecho coincide con lo mostrado en la figura 6.45, que permite intuir una tendencia lineal de la rigidez con el porcentaje de llenado.

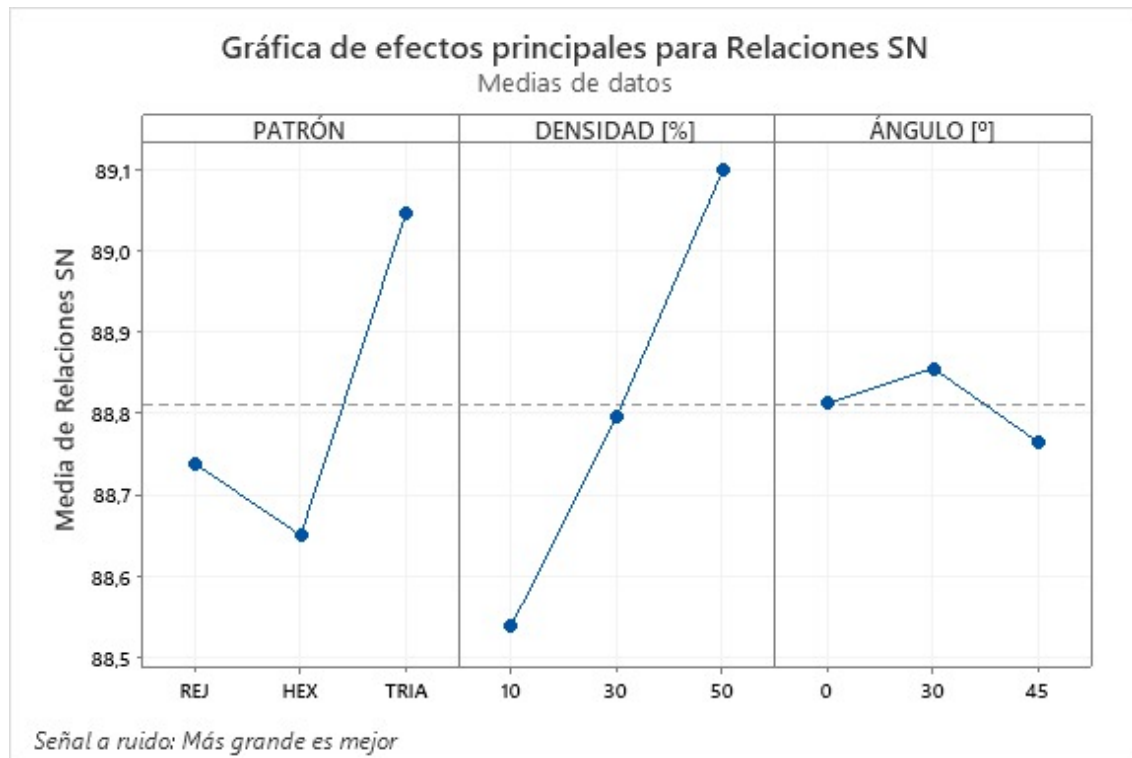


Figura 6.45 Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

Centrándonos ahora en dicha gráfica, puede comprobarse que es la densidad de ocupación, el factor más relevante según la función Señal-Ruido. Esto se muestra en la figura como un cambio más abrupto entre sus niveles que además ostentan los valores más bajo y más alto del SN. Puede decirse entonces que, a priori, parece ser la densidad de ocupación el factor más relevante de los 3 estudiados, exhibiendo además un comportamiento casi lineal. Con respecto al patrón de la estructura interna, se encuentra un máximo del SN para la geometría triangular, lo cual según Taguchi indicaría un mejor comportamiento del sistema a flexión. Por contra, el tipo de estructura interna que parece ofrecer peores resultados es el hexagonal. El ángulo de deposición del filamento parece ser el factor de menor peso en el comportamiento de la pieza final, esto se ve en la relativamente pequeña variación de los valores del SN mostrados por cada uno de los niveles estudiados. El

óptimo de la función SN para este factor se alcanza a los 30°, y el ángulo menos deseable es 45°. Para una comparación más clara de las variaciones de la S-N de cada uno de los parámetros, puede observarse la tabla de la figura 6.46. A la luz de estos valores de la

ESPÉCIMEN FLEXIÓN	MAX SN	MIN SN	Δ	%
DENSIDAD	89,10	88,54	0,56	53,33
PATRÓN	174,00	171,30	2,70	40,91
ÁNGULO	88,86	88,76	0,10	9,52

Figura 6.46 Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.

función SN, la configuración del espécimen que optimizaría su resistencia a flexión, sería: patrón triangular al 50 % de densidad con un ángulo de deposición del filamento de 30°. Casualmente, dicha configuración coincide con la del espécimen N°9, por lo que los datos de su comportamiento ya han sido calculados y por tanto, son conocidos.

Los valores medios del módulo elástico a flexión, obtenidos para cada nivel y factor, pueden verse en la gráfica 6.47. Puede observarse que los resultados de la gráfica SN de Taguchi, coinciden en buena medida con los de esta figura.

Se realiza a continuación, una comparación entre la geometría estimada como óptima (a efectos de su comportamiento a flexión) y el espécimen macizo.

Tal y como se muestra en la figura 6.48, la geometría determinada como óptima y el espécimen macizo presentan comportamientos a flexión relativamente similares (un 2,569 % de variación). Con la geometría N°9 se consigue además una reducción al 19,5 % del peso total del espécimen y consecuentemente de los costes. Se considerará por tanto una buena alternativa el empleo de la configuración TRIA-50 %-30°.

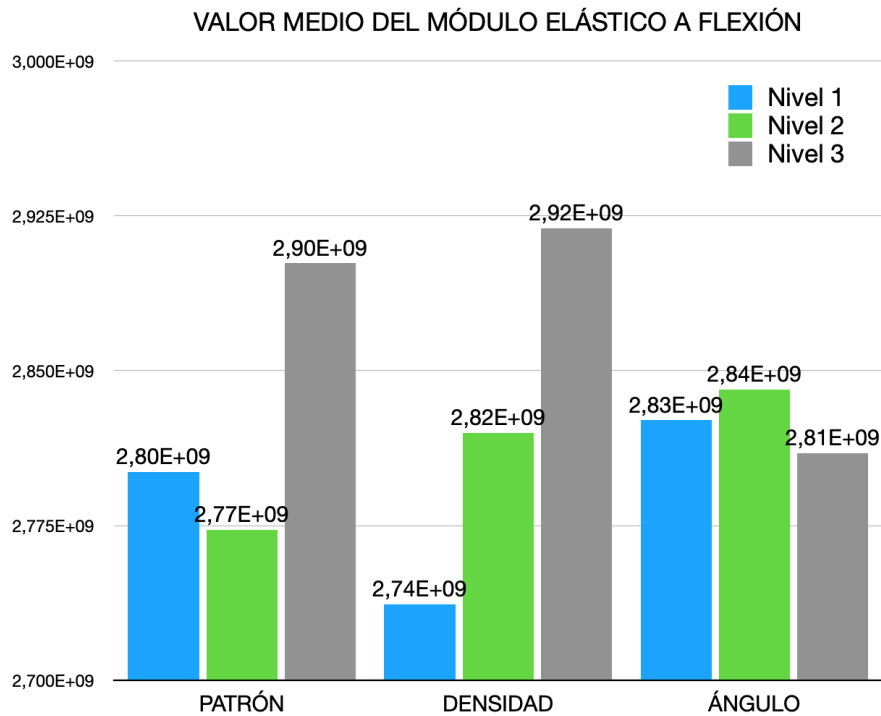


Tabla Flexion

Tabla Análisis Flexión	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
PATRÓN	2,801E+09	2,773E+09	2,902E+09
DENSIDAD	2,737E+09	2,820E+09	2,919E+09
ÁNGULO	2,826E+09	2,841E+09	2,810E+09

Figura 6.47 Evolución del valor medio del módulo elástico (en Pascales) según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

Comportamiento a flexión

Comparativa Óptimo-Espécimen Macizo	MÓDULO ELÁSTICO [Pa]	RIGIDEZ [N/m]	PESO [kg]	PRECIO [€]
Espécimen Macizo	3,070E+09	2,997E+04	3,968E-03	0,1849
Tria-50%-30°	2,990E+09	2,920E+04	3,194E-03	0,1489
Diferencia porcentual [%]	2,569		19,500	

Figura 6.48 Comparación de los comportamientos a flexión del espécimen macizo y la geometría óptima.

6.6 Análisis modal.

6.6.1 Geometría.

Pueden encontrarse las dimensiones del espécimen en la figura 5.11 y el porqué de su elección en el capítulo 5, en la sección correspondiente a este ensayo.

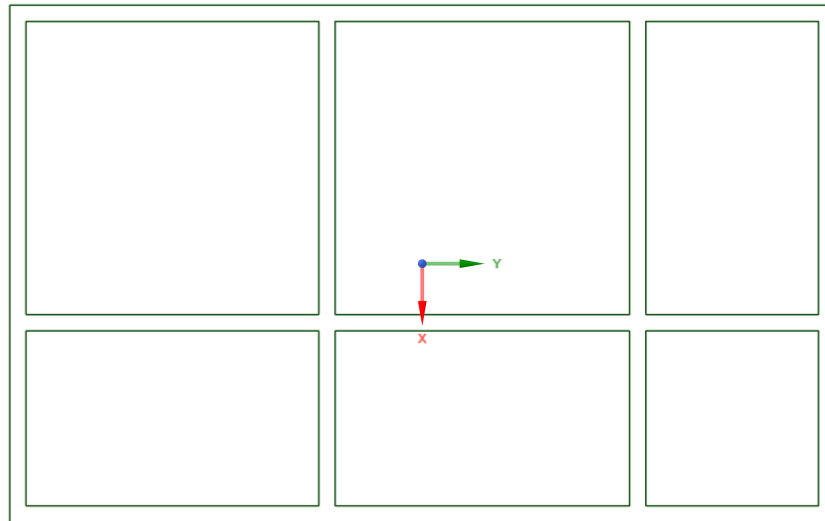


Figura 6.49 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10% y ángulo de deposición de 0.

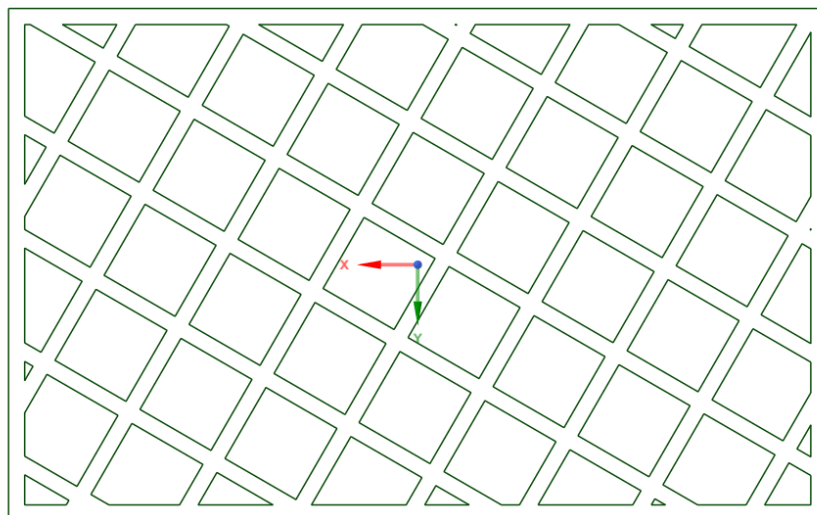


Figura 6.50 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30% y ángulo de deposición de 30.

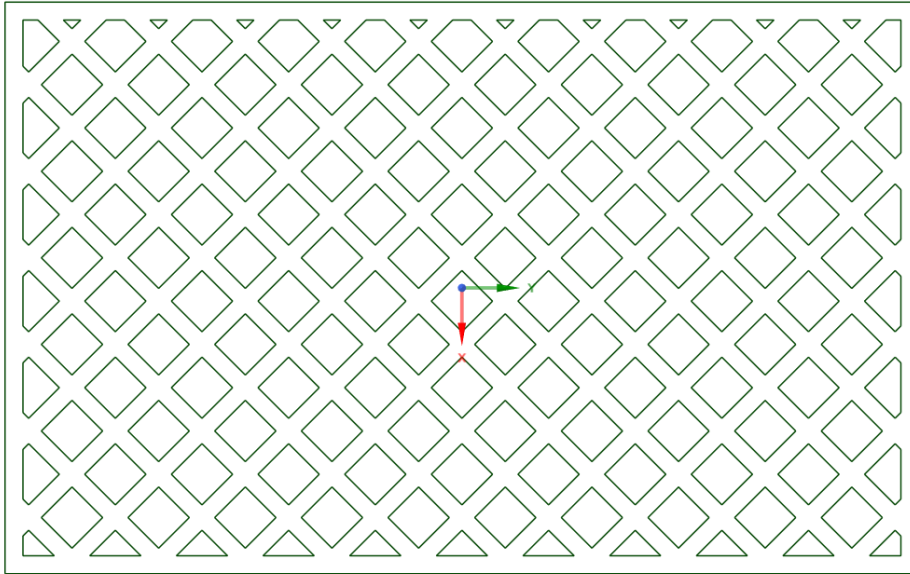


Figura 6.51 Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50% y ángulo de deposición de 45.

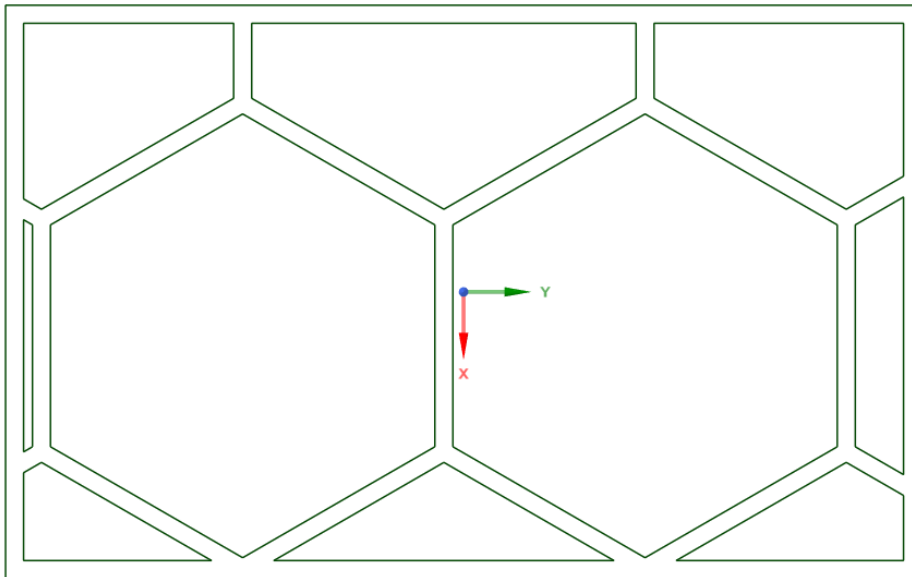


Figura 6.52 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10% y ángulo de deposición de 30.

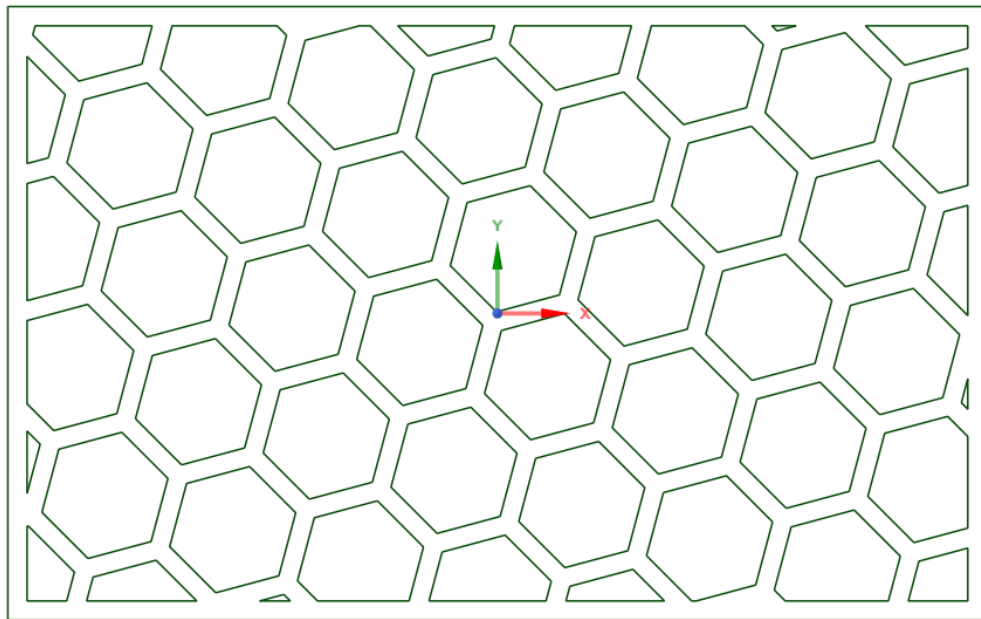


Figura 6.53 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

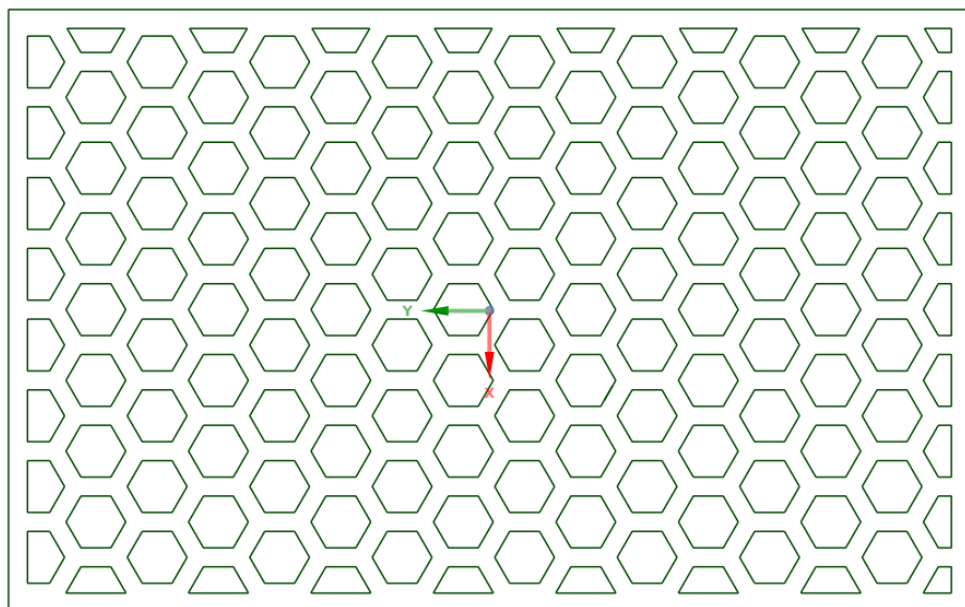


Figura 6.54 Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0.

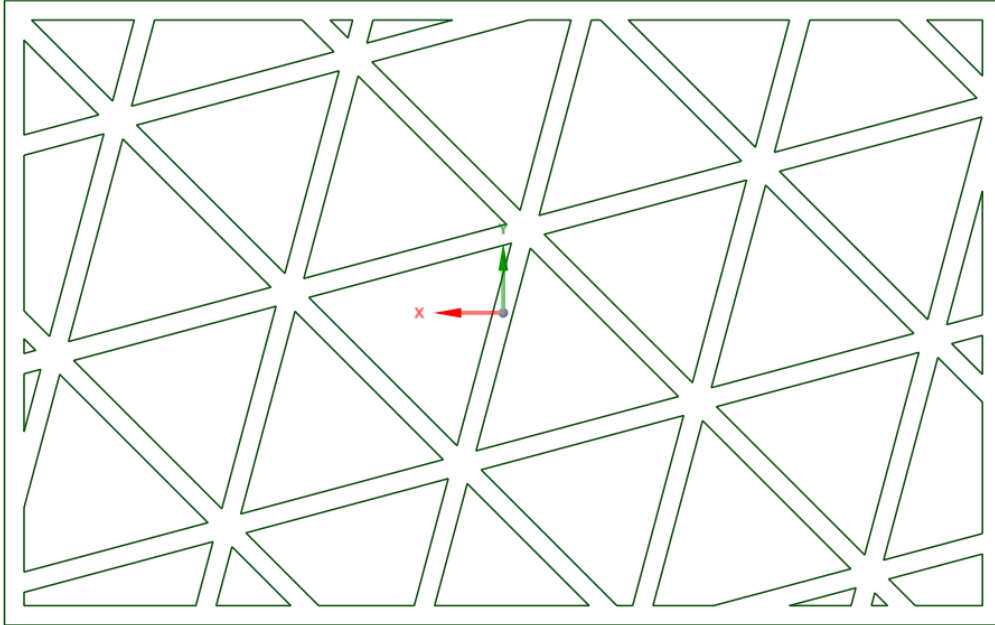


Figura 6.55 Espécimen de patrón triangular con densidad del 10% y ángulo de deposición de 45.

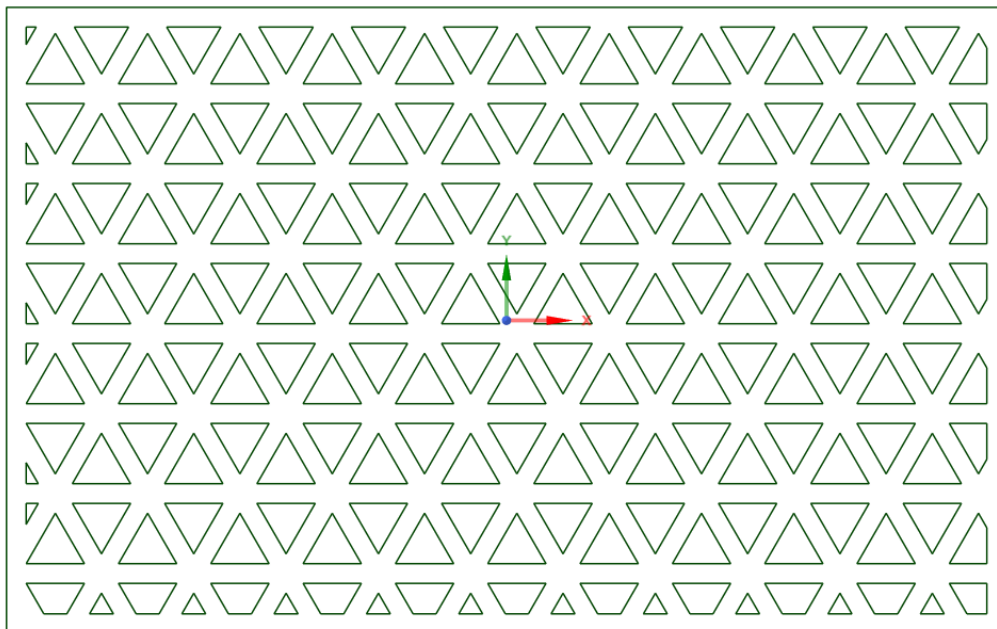


Figura 6.56 Espécimen de patrón triangular con densidad del 30% y ángulo de deposición de 0.

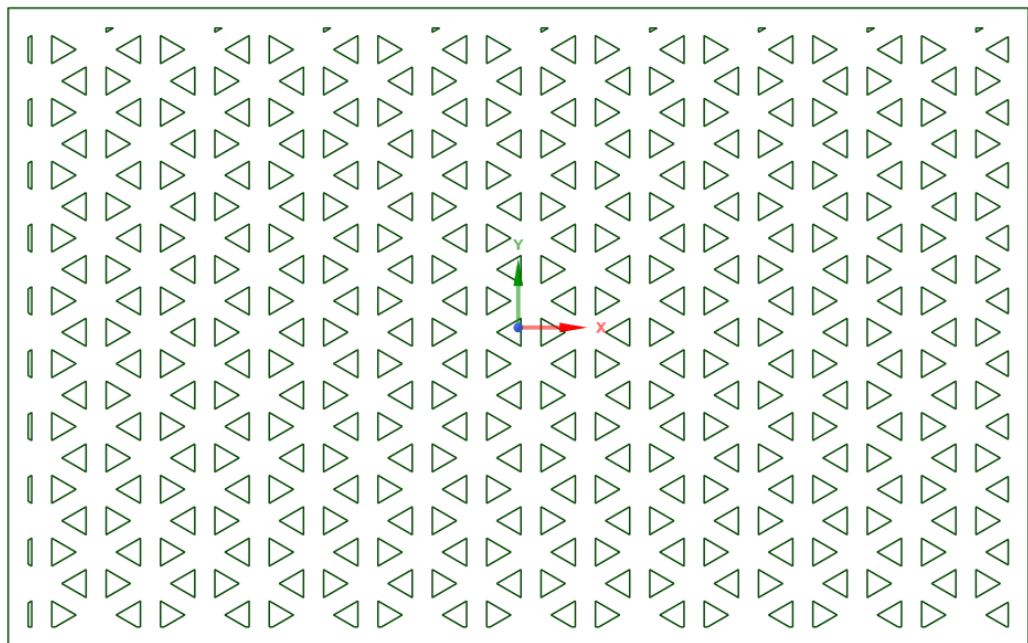


Figura 6.57 Espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30.

6.6.2 Resultados del análisis.

Cabe destacar que el sistema modelado, trata de emular las condiciones reales de ensayo, sin embargo; con el objetivo de simplificar el cálculo se han hecho algunas aproximaciones razonadas.

- Se realiza en ANSYS un análisis modal.
- La masa colocada en el extremo tiene un valor de 0.012kg y se modela como una masa distribuida a lo largo de una línea, en concreto en el extremo libre del espécimen.
- En el otro extremo, se aplica para toda su superficie, la condición de empotramiento. Obviándose por tanto, la zona en contacto con las mordazas y los posibles deslizamientos entre éstas y el propio espécimen.
- El desplazamiento mostrado en los resultados se corresponde con la amplitud modal en la dirección transversal.

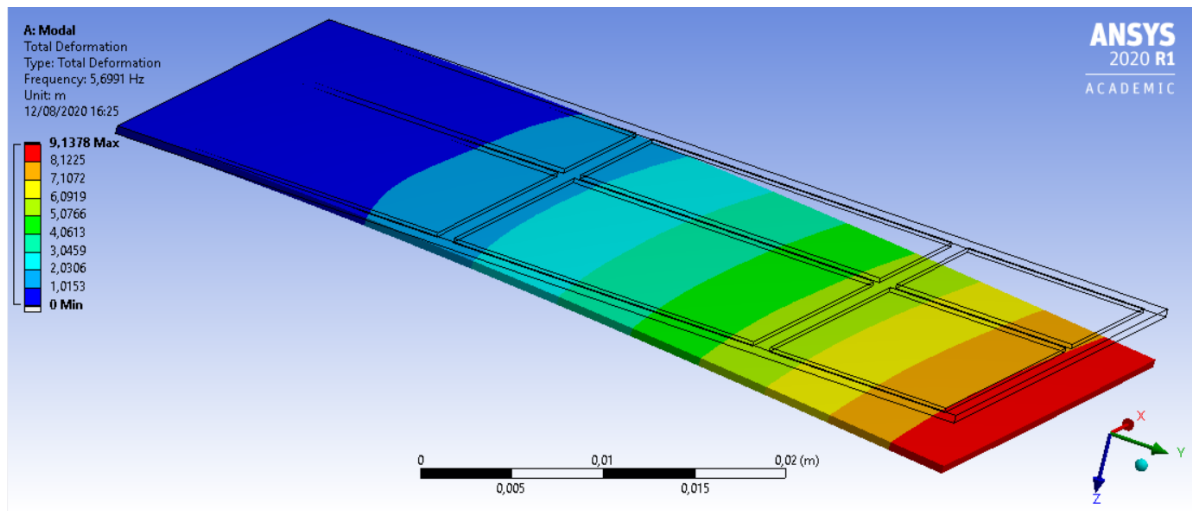


Figura 6.58 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0.

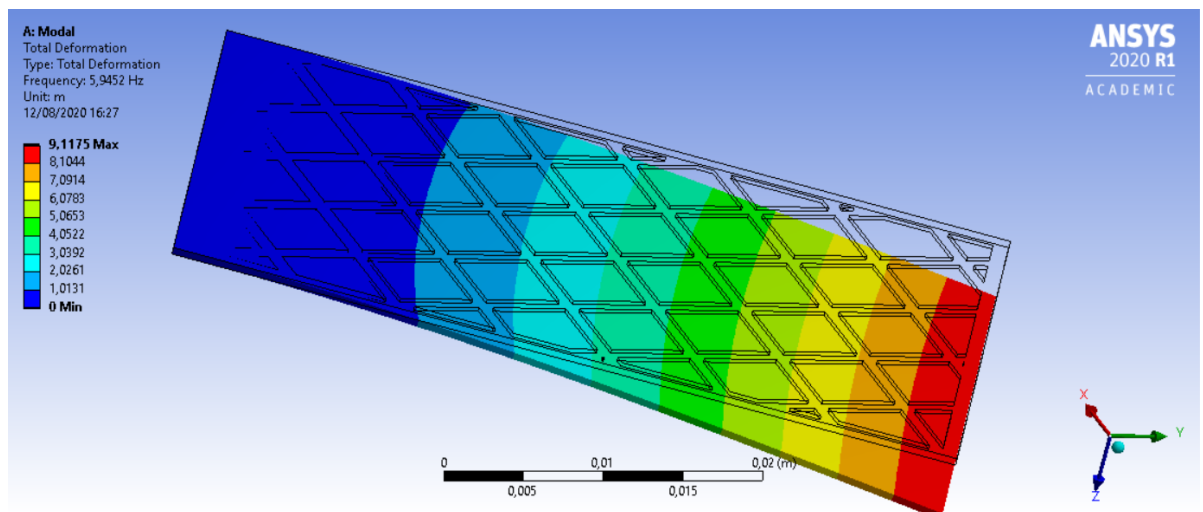


Figura 6.59 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30.

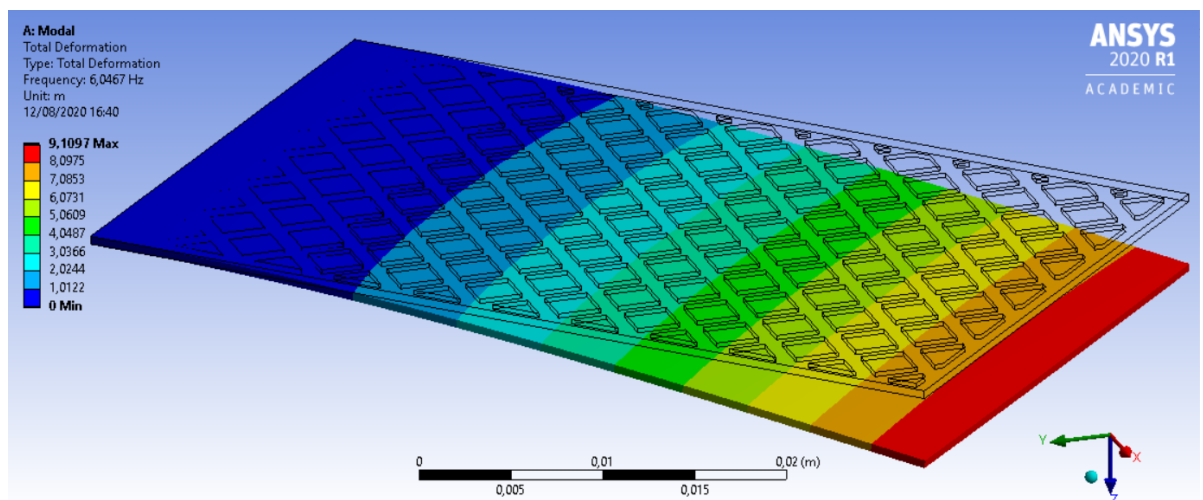


Figura 6.60 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45.

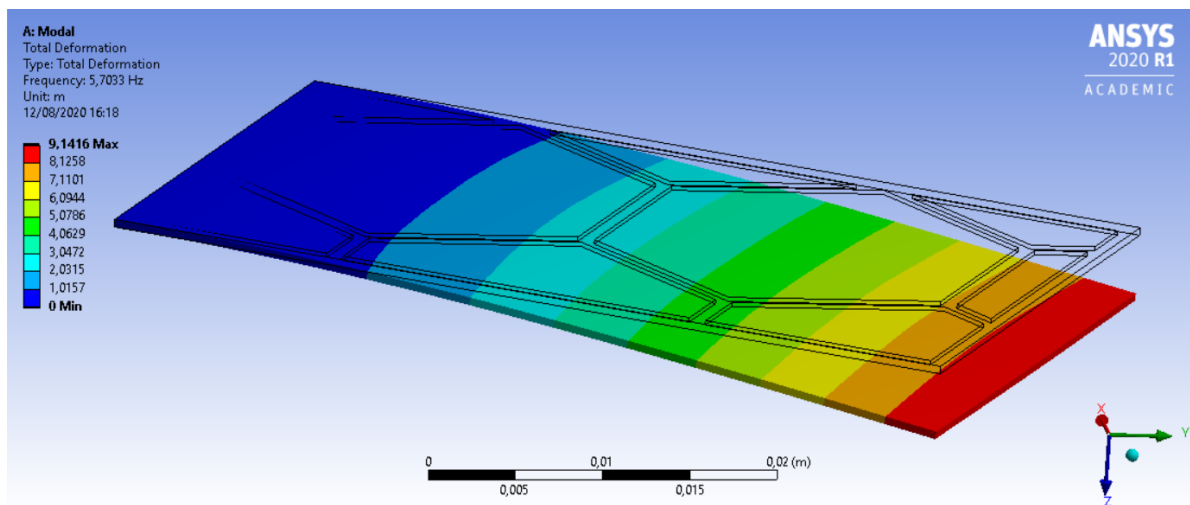


Figura 6.61 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30.

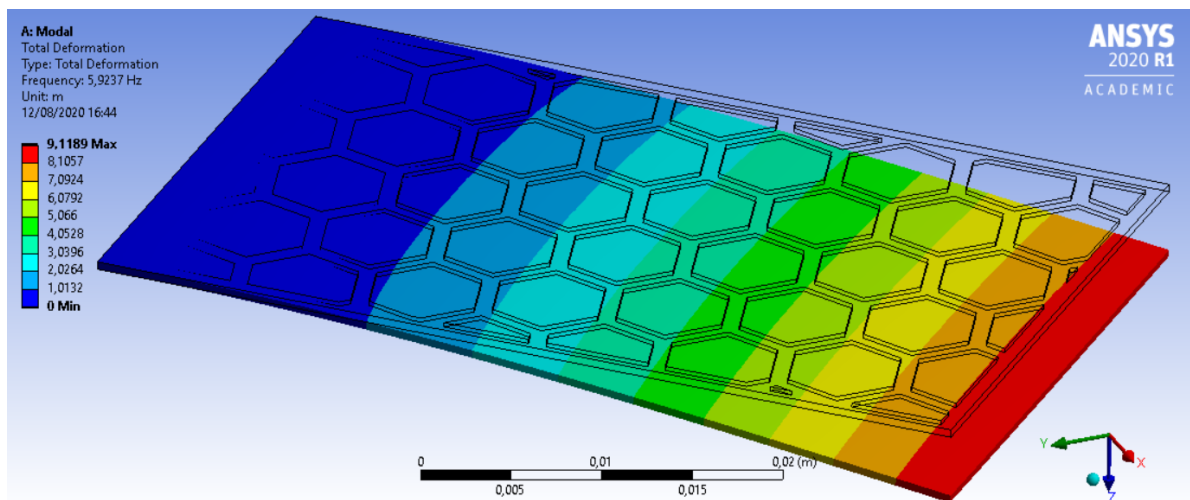


Figura 6.62 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45.

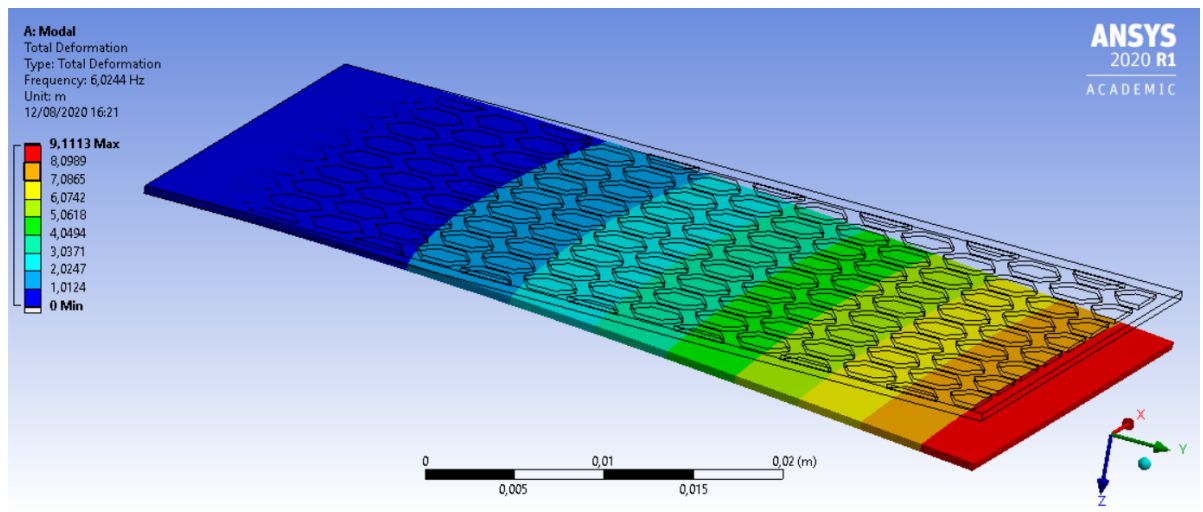


Figura 6.63 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0°.

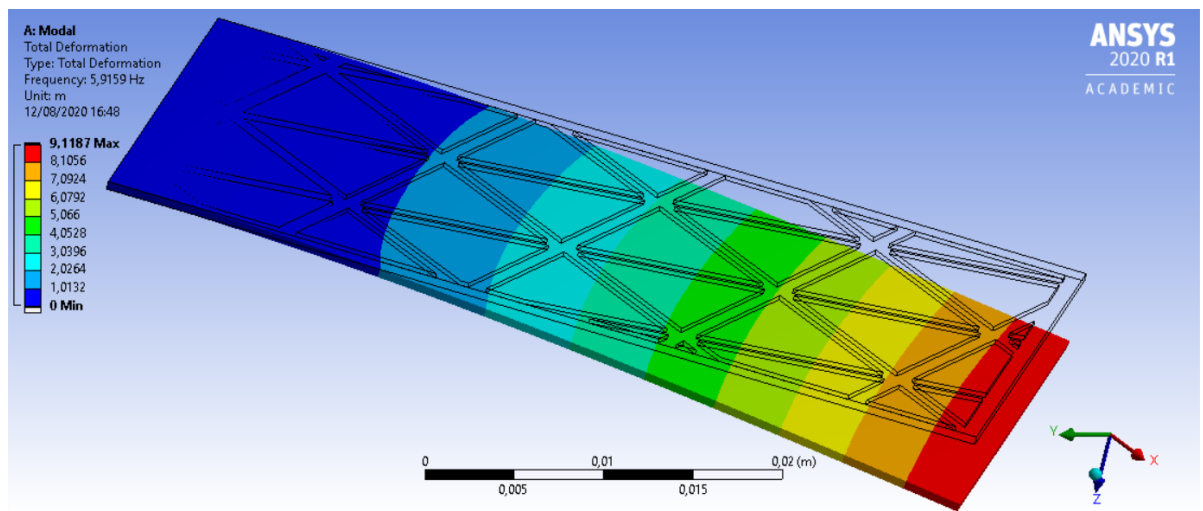


Figura 6.64 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45°.

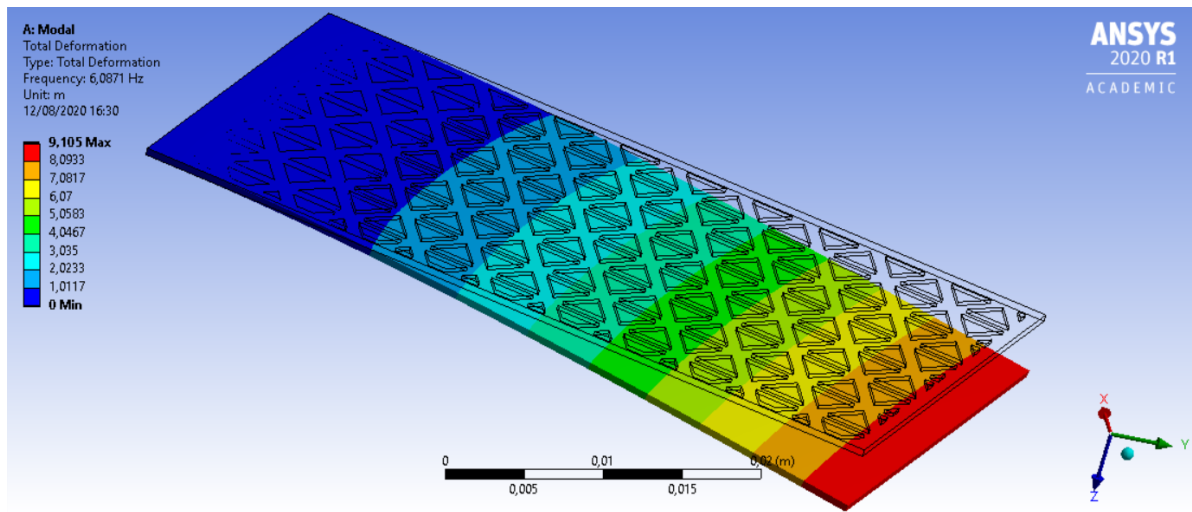


Figura 6.65 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0°.

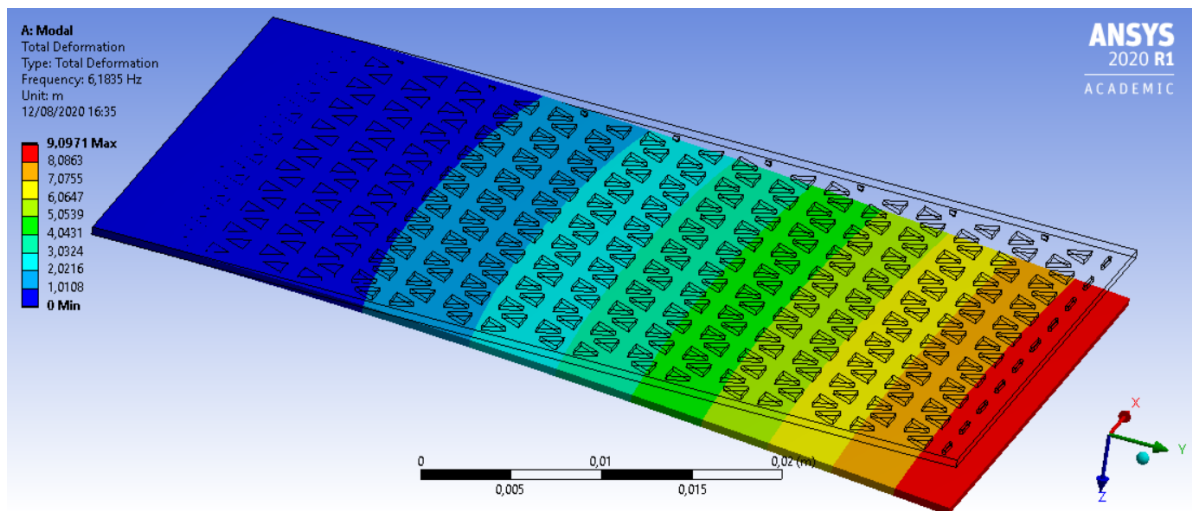


Figura 6.66 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30°.

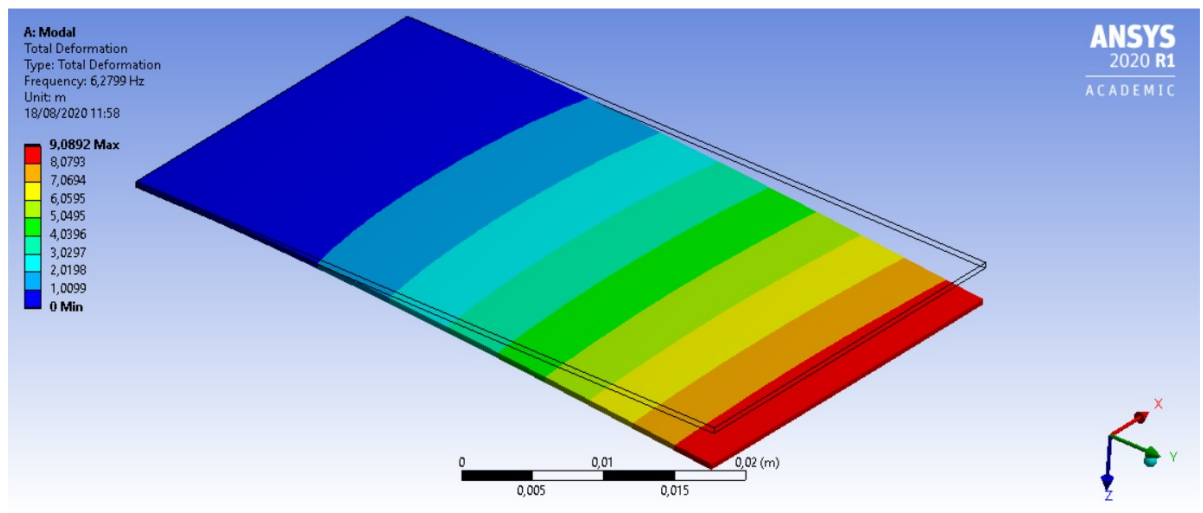


Figura 6.67 Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 50% y ángulo de deposición de 30°.

6.6.3 Análisis de los resultados presentados.

En la figura 6.68 se resumen los valores obtenidos en el apartado 6.6.2. En la última fila de la tabla se presenta el caso de espécimen macizo (obviamente para este caso no tiene sentido definir ni patrón, ni ángulo de llenado).

ANÁLISIS MODAL			
ESPÉCIMEN			FRECUENCIA NATURAL CORRESPONDIENTE AL PRIMER MODO [HZ]
PATRÓN	DENSIDAD [%]	ÁNGULO [°]	
REJ	10	0	5,6991
REJ	30	30	5,9452
REJ	50	45	6,0467
HEX	10	30	5,7033
HEX	30	45	5,9237
HEX	50	0	6,0244
TRIA	10	45	5,9159
TRIA	30	0	6,0871
TRIA	50	30	6,1835
	100		6,2799

Figura 6.68 Resultados obtenidos en el análisis modal.

El software "Minitab" permite extraer directamente de los resultados de Taguchi algunas gráficas de interés como son "Valor medio vs los diferentes parámetros" y "Valor de la función Señal-Ruido vs los diferentes parámetros". Se presentan a continuación. En la figura 6.68 puede observarse como, análogamente a lo que sucedía en el caso a flexión, el menor desplazamiento es alcanzado por el espécimen macizo, que presenta además, el valor más elevado de ω_n . Si se estudian a continuación los valores de la función SN obtenidos por cada factor y nivel (figura 6.69) y se visualiza la comparación entre ellos de la figura 6.70, puede comprobarse que:

- Nuevamente, la densidad de ocupación presenta el crecimiento más abrupto y por tanto, según el método de Taguchi, parece ser el factor de mayor peso en la determinación de la frecuencia natural del sistema.
- Observando las figuras 6.22, 6.46 y 6.70, puede verse como la densidad de relleno tiene una mayor influencia en el comportamiento modal (comparativamente al comportamiento a flexión y tracción). Por otro lado, se ve menos afectado por el patrón y el ángulo de deposición, en comparación a los comportamientos a flexión y tracción.
- Aunque el óptimo sigue siendo el correspondiente a un valor de la densidad del 50%; debe destacarse que, la evolución mostrada no es tan lineal como la observable en los comportamientos a tracción y flexión.
- El segundo factor en orden de importancia, vuelve a ser el patrón de la estructura interna. Si bien el resultado guarda semejanza con la gráfica de la figura 6.45 correspondiente a la flexión, en la del análisis modal encontramos que la diferencia enre

los patrones de rejilla y hexagonal no es tan notable. El óptimo sigue correspondiendo al patrón triangular.

- Con respecto al ángulo de deposición del filamento, puede decirse que a efectos de la frecuencia natural, resulta ser el de menor importancia. Teniendo sus niveles valores muy aproximados en comparación a los otros 2 parámetros estudiados. En este caso el ángulo óptimo es 45° y el menos beneficioso el de 0°, sin embargo; como se comentaba, esta diferencia parece insignificante comparativamente a la densidad de ocupación o el patrón interno.

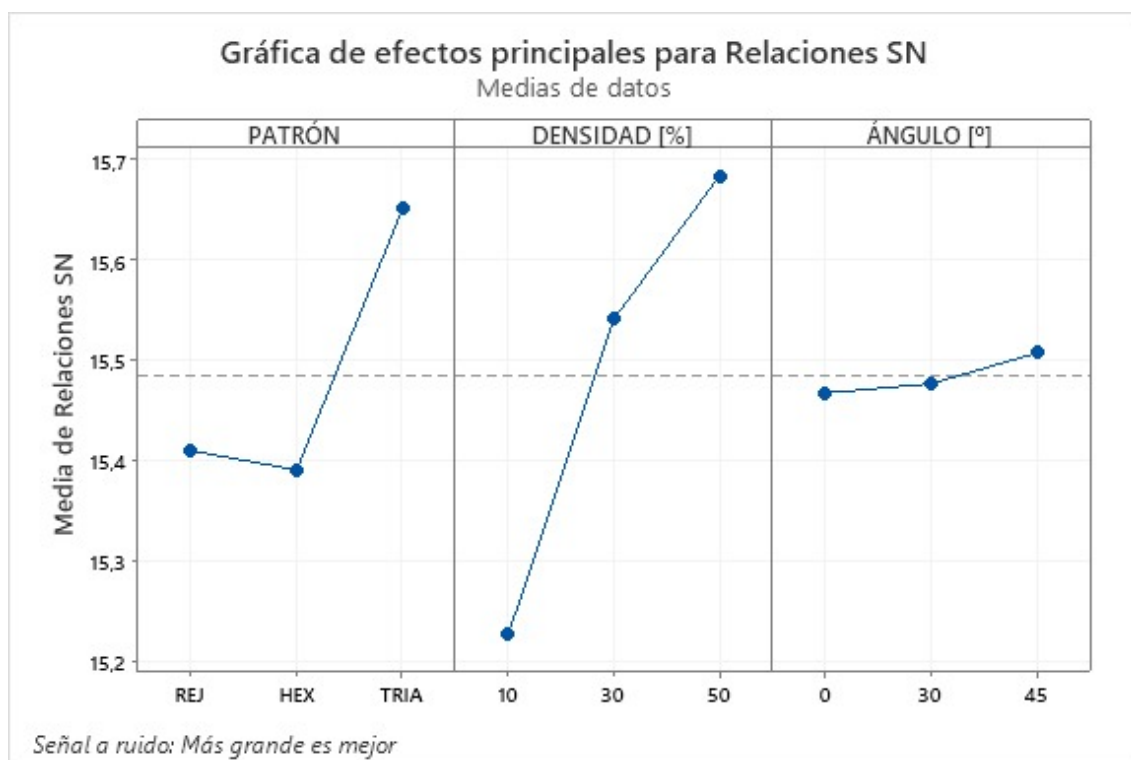


Figura 6.69 Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

ESPÉCIMEN MODAL	MAX SN	MIN SN	Δ	%
DENSIDAD	15,68	15,23	0,45	60,00
PATRÓN	15,65	15,39	0,26	34,67
ÁNGULO	15,51	15,47	0,04	5,33

Figura 6.70 Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.

Pueden observarse ahora los valores medios obtenidos por factor y nivel en la figura 6.71.

Por todo ello, el espécimen que Taguchi predice como el óptimo del comportamiento modal sería el TRIA-50%-45°, cuyo resultado se ha calculado para completar el estudio y se muestra en la figura 6.73. A continuación se presentará una comparación entre el espécimen determinado como óptimo (TRIA-50%-45°) y el macizo y se calculará la diferencia porcentual de ω_n y masa entre ellos. Debido al poco peso que parece tener el

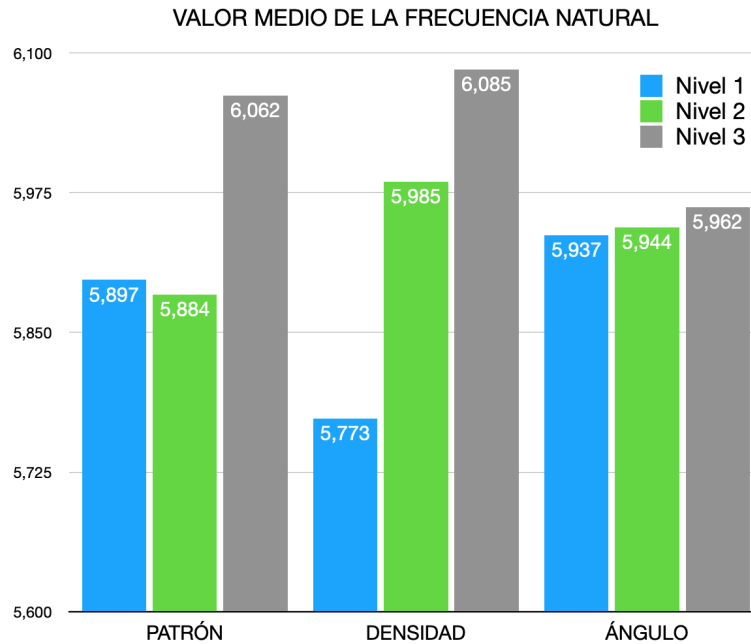


Tabla Modal

Tabla Análisis Modal	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
PATRÓN	5,897	5,884	6,062
DENSIDAD	5,773	5,985	6,085
ÁNGULO	5,937	5,944	5,962

Figura 6.71 Evolución del valor medio de la frecuencia natural según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.

ángulo de deposición del filamento en la determinación de la frecuencia natural; y estando ya calculado el caso N°9 que unicamente difiere en el ángulo de deposición (teniendo el segundo valor más favorable en lugar del primero) y resulta ser el óptimo de los apartados y , se optará por realizar una comparación del óptimo frente al caso N°9 y el espécimen macizo, para así, poder comprobar la mejora relativa entre uno y otro caso.

Comparativa comportamiento modal.

Comparativa Óptimo-Espécimen Macizo	FRECUENCIA NATURAL		PESO	
	Valor [Hz]	Diferencia porcentual Frecuencia Natural [%]	Valor [kg]	Diferencia porcentual Peso [%]
Espécimen Macizo	6,2799		9,052E-04	
Tria-50%-30° (Esp. N°9)	6,1835	1,535	7,248E-04	19,929
Tria-50%-45°	6,2112	1,094		

Figura 6.72 Comparación de los comportamientos modales del espécimen macizo, la geometría óptima y el caso N°9.

Como puede observarse la diferencia entre el comportamiento modal del espécimen macizo y el considerado como óptimo, es considerablemente pequeña ($\sim 1,094\%$). Con respecto a la diferencia entre dicho óptimo y el caso N°9, el valor más alto de la frecuencia natural se da para el espécimen óptimo (TRIA-50 %-45°) difiriendo unicamente en un

0,441 % del valor del N°9, lo que resulta prácticamente despreciable. Esta variación tan ligera del resultado concuerda con lo anteriormente dicho, es decir; que si bien el óptimo del comportamiento modal se da para un valor del ángulo de deposición de 45° , este parámetro es de escasa importancia frente a la elección del patrón y la densidad de llenado. Obviamente, ambos especímenes tienen el mismo peso, pues la densidad de su relleno es idéntica.

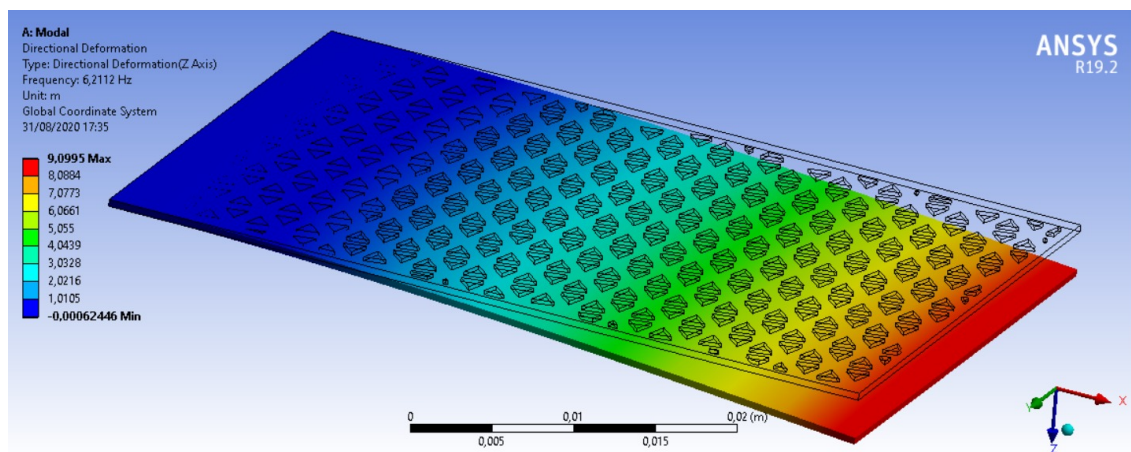


Figura 6.73 Resultado del ensayo modal del espécimen óptimo, patrón triangular con densidad del 50% y ángulo de deposición de 45° .

Por otro lado, cabe destacar que, aunque la diferencia de peso con el espécimen macizo, vista desde el punto de vista porcentual, parezca considerable, repercute muy poco en el total de material, pues el espécimen diseñado para el análisis modal es el menos voluminoso de los 3 (veánse las figuras 5.3, 5.6 y 5.11).

A la vista de estos resultados, podría decirse que si bien Taguchi predice acertadamente un mejor comportamiento modal para el caso TRIA-50%- 45° , la diferencia con el caso N°9 (TRIA-50%- 30°), es mínima. Siendo este último el óptimo de los análisis a tracción y flexión, parece a priori conveniente considerar el espécimen TRIA-50%- 30° como óptimo global.

7 Conclusiones

En este capítulo van a redactarse las conclusiones extraídas de los resultados presentados en capítulos anteriores.

7.1 Conclusiones generales.

Para comenzar debe destacarse que debido a la aplicación concreta en la que se enfoca este trabajo, nos hemos centrado en intentar optimizar el valor de los módulos elásticos a tracción y flexión, así como del comportamiento modal de la pieza final. Se comenzó seleccionando el método concreto de fabricación aditiva que resultase más conveniente. La elección se realizó en base a dos cuestiones principalmente:

- Cuestión económica. El relativamente alto precio de la maquinaria y los materiales requeridos por algunos de los métodos considerados, nos obligaron a descartar: DED (Directed energy deposition), PBF (Power Bed Fusion) y VP (Vat Photopolymerization). Esta decisión redujo las posibilidades a: ME (métodos basados en la extrusión), MJ (multijet), BJ (binder jetting) y SL (procesos basados en la laminación).
- Cuestión mecánica. Conseguir un adecuado comportamiento mecánico de las piezas resultantes es prioritario, pues entre otras condiciones, éstas se someterán a fatiga. Atendiendo a lo cual se determinó que:
 - El BJ produce piezas mecánicamente pobres y, con frecuencia, necesitadas de posproceso. Por esta razón, se descarta.
 - Las piezas fabricadas mediante SL dependen en gran medida del adhesivo usado para cohesionar las láminas y por ello, sus propiedades no suelen ser óptimas. Por esta razón, se descarta.
 - La fotosensibilidad y pobre elongación en rotura no hacen viable al MJ para esta aplicación.
 - El ME resulta ser la mejor alternativa pues aunque la precisión dimensional o el acabado superficial no sean óptimos, ambos pueden corregirse con la adecuada elección del espesor del cordón. Además, las propiedades mecánicas son aceptables y existe abundante bibliografía en la que apoyar la investigación.

Tras este estudio preliminar de los métodos de fabricación aditiva, se abordó la elección del material. Nuevamente para ello, volvimos a considerar las mismas cuestiones:

- Atendiendo a las propiedades mecánicas de los materiales, destacaban el PLA y los filamentos reforzados. Ambos exhibían buenas propiedades, sin embargo; aunque los filamentos reforzados tienen notables ventajas, introducen en el estudio una mayor complejidad, que en un análisis teórico como este resulta difícil de abordar.
- Económicamente, el PLA resultaba la mejor opción frente a los filamentos reforzados que además de tener un coste bastante más elevado, podrían necesitar adaptadores de la boquilla de impresión y otros complementos.

Llegados a este punto, queda concluir los resultados de la optimización del proceso de impresión para el filamento de PLA.

7.2 Conclusión final y desarrollos futuros.

Terminaremos haciendo una recapitulación de los puntos más importantes. Así como analizando algunas mejoras y ampliaciones que puedan hacerse a este trabajo.

Como comentario adicional resulta de interés observar como evoluciona el peso del espécimen con el porcentaje de relleno, ya que este parece ser el factor más determinante con respecto a los 3 tipos de análisis realizado. Para ilustrarlo nos ayudaremos de las gráficas de las figuras 7.1 y 7.2.

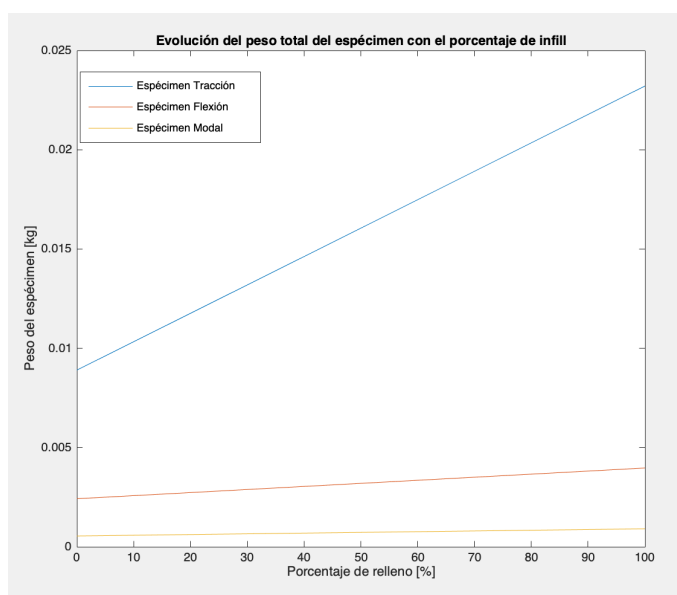


Figura 7.1 Evolución del peso del espécimen según el porcentaje de ocupación.

En la figura 7.1, se muestra el peso del espécimen (eje vertical) frente al porcentaje de relleno (horizontal), para los 3 tipos de ensayo realizados. El aumento de peso del espécimen del análisis a tracción es comparativamente mucho más significativo que el de los otros dos especímenes, que en contraste, parecen casi mantenerse constantes. Obviamente, todos ellos evolucionan aumentando su peso con el porcentaje de densidad; sin embargo, emplear un 50% de densidad en el espécimen modal, implica una disminución de $\sim 0,0002\text{kg}$ (véase

la figura 6.72) frente a la disminución de $\sim 0,007\text{kg}$ que generaría emplear un espécimen de tracción con ese mismo vaciado (50%).

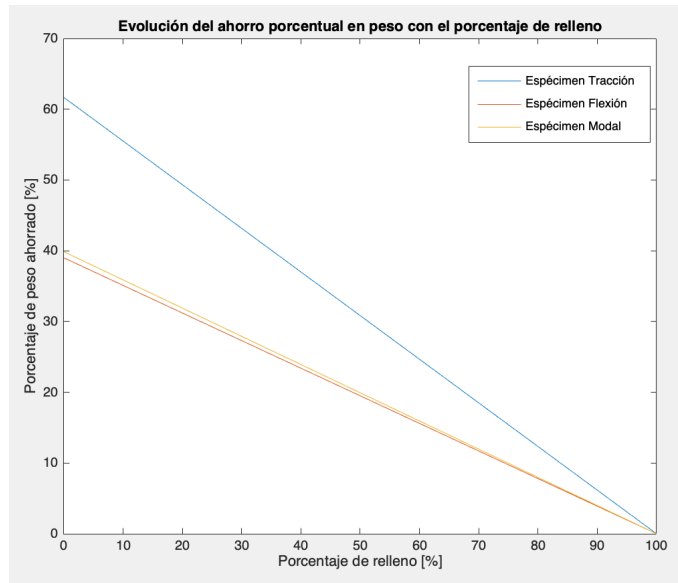


Figura 7.2 Evolución del ahorro porcentual en peso según el porcentaje de ocupación.

Si para cada test, se compara el peso ahorrado con el vaciado frente al peso de la geometría maciza, se tienen las gráficas de la figura 7.2. Donde puede observarse que la evolución del porcentaje de peso ahorrado para los especímenes a flexión y modal, no es ni mucho menos nula. Sin embargo a efectos del total, sí que es menos relevante. En concreto, en la figura 7.3, puede verse el desglose de la reducción de costes para este trabajo.

Desglose de costes y pesos.

ESPÉCIMEN	DENSIDAD [%]	PESO AHORRADO / ESPÉCIMEN [kg]	PESO AHORRADO TOTAL [kg]	AHORRO/ ESPÉCIMEN [€]	AHORRO TOTAL [€]
TRACCIÓN	10	0,0129	0,5796	0,6002	27,0088
	30	0,0100	0,4508	0,4668	21,0069
	50	0,0072	0,3220	0,3334	15,0049
FLEXIÓN	10	0,0014	0,0627	0,0649	2,9206
	30	0,0011	0,0487	0,0505	2,2716
	50	0,0008	0,0348	0,0361	1,6226
MODAL	10	0,0003	0,0146	0,0151	0,6810
	30	0,0003	0,0114	0,0118	0,5297
	50	0,0002	0,0081	0,0084	0,3783

Figura 7.3 Desglose de costes y reducciones de precios por espécimen y porcentaje de relleno.

Tras este apunte, se pasa a resumir las conclusiones más importantes de este trabajo.

- En todos los ensayos el factor más determinante parece ser la densidad de ocupación, la cual presenta una evolución casi lineal.

- El máximo de la resistencia a tracción (y consecuentemente el módulo de Young) fue documentado por [32] para una densidad del 100 %.
- En todos los ensayos resulta ser el ángulo de deposición del filamento el factor que tiene menos influencia sobre el comportamiento del sistema. El valor óptimo de éste parece variar según queramos mejorar el comportamiento a tracción, flexión o modal del espécimen.
- En los 3 análisis, parece ser el patrón triangular el óptimo. El patrón de rejilla resulta ser la segunda mejor opción si se trata de comportamiento a tracción, mientras que en los análisis modal y a flexión, ha resultado ser el que peores resultados arroja.
- La combinación óptima de los parámetros estudiados ha resultado ser, según el análisis:
 - En análisis a tracción: Patrón triangular con una densidad de ocupación del 50 % y un ángulo de deposición del filamento de 30°, coincidiendo con espécimen N°9 de los ensayos.
 - En análisis a flexión: Patrón triangular con una densidad de ocupación del 50 % y un ángulo de deposición del filamento de 30°, coincidiendo con espécimen N°9 de los ensayos.
 - En análisis modal: Patrón triangular con una densidad de ocupación del 50 % y un ángulo de deposición del filamento de 45°. Sin embargo, en la figura 6.73, se mostraba la escasa diferencia entre los valores de la ω_n obtenida para éste y para el espécimen N°9 ($\sim 0,441$ %). Por esto último, se considera el espécimen N°9 como óptimo global.
- En la figura 7.4 se puede ver el porcentaje del salto de S-N para cada análisis, con ello pretende ilustrarse que, si bien no es correcto comparar los valores de la S-N entre sí para distintos análisis, el porcentaje asociado a cada factor del estudio puede darnos una idea de la influencia de éste. En concreto, parece ser que es en el análisis

ESPÉCIMEN	DENSIDAD				PATRÓN				ÁNGULO			
	MAX SN	MIN SN	Δ	%	MAX SN	MIN SN	Δ	%	MAX SN	MIN SN	Δ	%
TRACCIÓN	173,70	170,70	3,00	45,45	174,00	171,30	2,70	40,91	172,60	171,70	0,90	13,64
FLEXIÓN	89,10	88,54	0,56	53,33	89,04	88,65	0,39	37,14	88,86	88,76	0,10	9,52
MODAL	15,68	15,23	0,45	60,00	15,65	15,39	0,26	34,67	15,51	15,47	0,04	5,33

Figura 7.4 Comparativa del salto de la S-N.

modal, donde la densidad de ocupación tiene más relevancia en la determinación del comportamiento de la pieza; consecuentemente, el patrón y el ángulo de deposición muestran una menor influencia. En el comportamiento a tracción, si bien sigue siendo predominante la densidad de ocupación, las "influencias relativas" de los 3 factores parecen igualarse un poco más. El caso de la flexión sería el intermedio.

- Debido a los valores tan relativamente "planos" de la S-N que presenta el ángulo de deposición, en contraste con los otros dos parámetros; quizás sería una buena opción realizar un análisis en el cual se fijen densidad de ocupación y patrón, y se estudien junto con el ángulo de deposición, otros dos factores de nivel de influencia similar.

De este modo, sería posible quizás, hallar un óptimo y determinar la importancia relativa de este parámetro. Según el método de Taguchi, podría estar enmascarándose la tendencia de este parámetro al compararse con la densidad de ocupación y el patrón, que exhiben una considerablemente mayor variación de la S-N.

- Teniendo en cuenta que la geometría de la estructura de soporte será dimensionalmente similar al espécimen sometido a análisis modal; la reducción de costes a causa del empleo de mayores vaciados solo será eficiente si se pretenden fabricar un elevado número de estas piezas.
- En principio, según la bibliografía consultada, resultaría aconsejable emplear un valor más reducido del espesor de capas. Un estudio que optimice éste sería una aconsejable adición a este texto. Podría, por ejemplo, estudiarse junto con el ángulo de deposición, tal y como se comentaba anteriormente.
- Para demostrar la viabilidad del PLA como sustituto del latón sería aconsejable añadir el PZT-5A al análisis modal, ya que éste aporta una considerable rigidez.
- Los filamentos reforzados parecen ofrecer muy buenas propiedades mecánicas, sin embargo; la necesidad de implementar accesorios a la impresora 3D, el requerido control de ciertos parámetros de ésta, así como las complejidades que tiene comprender su comportamiento; dificultan este estudio. Se deja como futura ampliación a este trabajo.

Índice de Figuras

1.1	Breve cronología del desarrollo de la recolección de energía.	2
1.2	Pierre (a la izquierda) y Paul-Jacques Curie (derecha), descubridores del efecto piezoeléctrico directo.	2
2.1	Comparativa general de procesos de AM	6
2.2	Comparativa general de procesos de AM	7
2.3	Modelo típico de máquina de FDM	8
2.4	Modelo típico de máquina de MJ	9
2.5	Modelo típico de máquina de BJ	9
2.6	Modelo típico de máquina de procesos de SLP	10
2.7	Modelo típico de máquina de procesos basados en la fotopolimerización	11
2.8	Modelo típico de máquina de PBF	12
2.9	Modelo típico de máquina de DED	13
2.10	Tabla comparativa de los diferentes procesos de AM	14
3.1	Resumen de factores del FFF que influyen en las propiedades de la pieza	16
3.2	Extrusor de doble husillo, típico en la fabricación de filamentos compuestos	19
3.3	Nomenclatura común de las diferentes direcciones de impresión para una probeta con geometría de paralelepípedo	19
3.4	Ángulo de deposición del filamento	20
3.5	Visualización de varios patrones de llenado y densidades de ocupación para una probeta de sección rectangular	21
3.6	Propiedades mecánicas de varios tipos de Nylon para FDM.	24
3.7	Tabla comparativa y propiedades mecánicas de filamentos para FDM.	27
3.8	Propiedades del PLA empleadas para los análisis en ANSYS.	28
4.1	Formación ortogonal de Genichi Taguchi	35
4.2	Determinación gráfica del efecto global de una combinación favorable de parámetros	37
5.1	Dimensiones del espécimen según la norma ASTM.	43

5.2	Velocidades de ensayo.	44
5.3	Geometría del espécimen a tracción (medidas en mm).	46
5.4	Valores recomendados de la velocidad de ensayo.	48
5.5	Esquema del ensayo a flexión a 3 puntos.	49
5.6	Geometría del espécimen a flexión (medidas en mm).	49
5.7	Vista detallada de la estructura ensayada en "Energy Harvesting Technologies".	50
5.8	Caracterización de la estructura ensayada en "Energy Harvesting Technologies".	50
5.9	Comparación de las funciones de transmisión obtenidas para una viga de latón y ABS [22].	52
5.10	Frecuencias naturales calculadas analíticamente para el latón, ABS y PLA.	53
5.11	Geometría del espécimen sometido a análisis modal (medidas en mm).	54
6.1	Formación ortogonal de Taguchi para 3 factores con 3 niveles	55
6.2	Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	59
6.3	Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	59
6.4	Espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45	59
6.5	Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	59
6.6	Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	60
6.7	Espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	60
6.8	Espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45	60
6.9	Espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0	60
6.10	Espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30	60
6.11	Resultado a tracción del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	61
6.12	Resultado a tracción del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	62
6.13	Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	62
6.14	Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	62
6.15	Resultado a tracción del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	63
6.16	Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45	63

6.17	Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0	64
6.18	Resultado a tracción del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30	64
6.19	Resultado a tracción del espécimen macizo.	64
6.20	Resultados obtenidos en el ensayo a tracción.	65
6.21	Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	66
6.22	Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.	66
6.23	Evolución del valor medio del módulo elástico (en Pascales) según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	67
6.24	Comparación de los comportamientos a tracción del espécimen macizo y la geometría óptima.	68
6.25	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	69
6.26	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	69
6.27	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45	69
6.28	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	69
6.29	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	70
6.30	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	70
6.31	Especimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45	70
6.32	Especimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0	70
6.33	Especimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30	70
6.34	Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	71
6.35	Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	72
6.36	Resultado a flexión del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45	72
6.37	Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	72
6.38	Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	73
6.39	Resultado a flexión del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	73
6.40	Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45	74

6.41	Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0	74
6.42	Resultado a flexión del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30	75
6.43	Resultado a flexión del espécimen macizo.	75
6.44	Resultados obtenidos en el ensayo a flexión.	76
6.45	Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	77
6.46	Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.	78
6.47	Evolución del valor medio del módulo elástico (en Pascales) según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	79
6.48	Comparación de los comportamientos a flexión del espécimen macizo y la geometría óptima.	79
6.49	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	80
6.50	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	80
6.51	Especimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45	81
6.52	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	81
6.53	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	82
6.54	Especimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	82
6.55	Especimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45	83
6.56	Especimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0	83
6.57	Especimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30	84
6.58	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 0	85
6.59	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 30	86
6.60	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón de rejilla con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45	86
6.61	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 30	87
6.62	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 45	87
6.63	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón hexagonal con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 0	88
6.64	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 10 % y ángulo de deposición de 45 ^a	88

6.65	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 30 % y ángulo de deposición de 0°	89
6.66	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30°	89
6.67	Resultado del ensayo modal del espécimen de patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 30°	90
6.68	Resultados obtenidos en el análisis modal.	91
6.69	Gráficas Señal-Ruido según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	92
6.70	Valores de la función Señal-Ruido según el parámetro y comparativa.	92
6.71	Evolución del valor medio de la frecuencia natural según el parámetro. Resultados obtenidos por análisis del método de Taguchi.	93
6.72	Comparación de los comportamientos modales del espécimen macizo, la geometría óptima y el caso N°9.	93
6.73	Resultado del ensayo modal del espécimen óptimo, patrón triangular con densidad del 50 % y ángulo de deposición de 45°	94
7.1	Evolución del peso del espécimen según el porcentaje de ocupación.	96
7.2	Evolución del ahorro porcentual en peso según el porcentaje de ocupación.	97
7.3	Desglose de costes y reducciones de precios por espécimen y porcentaje de relleno.	97
7.4	Comparativa del salto de la S-N.	98

Bibliografía

- [1] Sana Abid, Rihab Messadi, Tarek Hassine, Hachmi Ben Daly, Jérémie Soulestin, and Marie France Lacrampe, *Optimization of mechanical properties of printed acrylonitrile butadiene styrene using rsm design*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **100** (2019), no. 5-8, 1363–1372.
- [2] Srinivas Athreya and YD Venkatesh, *Application of taguchi method for optimization of process parameters in improving the surface roughness of lathe facing operation*, International Refereed Journal of Engineering and Science **1** (2012), no. 3, 13–19.
- [3] C Aumnate, S Limpanart, N Soatthiyanon, and S Khunton, *Pp/organoclay nanocomposites for fused filament fabrication (fff) 3d printing*, eXPRESS Polymer Letters **13** (2019), no. 10, 898–909.
- [4] Samuel Clinton Daminabo, Saurav Goel, Sotirios A Grammatikos, and Hamed Yazdani, *Fdm-based additive manufacturing (3d printing): Techniques for polymer material systems*.
- [5] Rahul Davis and Pretesh John, *Application of taguchi-based design of experiments for industrial chemical processes*, Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes **137** (2018).
- [6] Statitics Explained Eurostat, *Estadísticas de energía renovable*, 2020.
- [7] OH Ezech and L Susmel, *On the fatigue strength of 3d-printed polylactide (pla)*, Procedia Structural Integrity **9** (2018), 29–36.
- [8] Ilenia Farina, Narinder Singh, Francesco Colangelo, Raimondo Luciano, Giulio Bonazzi, and Fernando Fraternali, *High-performance nylon-6 sustainable filaments for additive manufacturing*, Materials **12** (2019), no. 23, 3955.
- [9] Miguel Fernandez-Vicente, Wilson Calle, Santiago Ferrandiz, and Andres Conejero, *Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3d printing*, 3D printing and additive manufacturing **3** (2016), no. 3, 183–192.
- [10] BCN3D filaments, *Datasheet abs*, 2020.
- [11] ———, *Datasheet paht cf15*, 2020.

- [12] ———, *Datasheet pla*, 2020.
- [13] ———, *Datasheet pp*, 2020.
- [14] ———, *Datasheet pp gf30*, 2020.
- [15] Alessandro Freddi and Mario Salmon, *Design principles and methodologies: From conceptualization to first prototyping with examples and case studies*, Springer, 2018.
- [16] Mateusz Galeja, Aleksander Hejna, Paulina Kosmela, and Arkadiusz Kulawik, *Static and dynamic mechanical properties of 3d printed abs as a function of raster angle*, *Materials* **13** (2020), no. 2, 297.
- [17] Ian Gibson, David Rosen, and Brent Stucker, *Binder jetting*, *Additive manufacturing technologies*, Springer, 2015, pp. 205–218.
- [18] Ian Gibson, David W Rosen, Brent Stucker, et al., *Additive manufacturing technologies*, vol. 17, Springer, 2014.
- [19] Ahmet İpekçi, Menderes Kam, and Hamit Saruhan, *Investigation of 3d printing occupancy rates effect on mechanical properties and surface roughness of pet-g material products*, *Journal of New Results in Science* **7** (2018), no. 2, 1–8.
- [20] Jingfang Li, Sanbao Li, Yawei Li, Ruiqi Li, Jun Nie, and Xiaoqun Zhu, *In situ monitoring of photopolymerization by photoinitiator with luminescence characteristics*, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **389** (2020), 112225.
- [21] Alejandro Javier del Médico Bravo et al., *Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida*, (2017).
- [22] Pablo Montero Oliva and Antonio Romero Ordóñez, *Trabajo de fin de grado. estudio de viabilidad del acrilonitrilo butadieno estireno (abs) en el desarrollo de microgeneradores de energía*.
- [23] Khaled G Mostafa, Carlo Montemagno, and Ahmed Jawad Qureshi, *Strength to cost ratio analysis of fdm nylon 12 3d printed parts*, *Procedia Manufacturing* **26** (2018), 753–762.
- [24] Bernhard Mueller, *Additive manufacturing technologies—rapid prototyping to direct digital manufacturing*, *Assembly Automation* (2012).
- [25] A Nugroho, R Ardiansyah, L Rusita, and I L Larasati, *Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid acid) by 3d printing*, *Journal of Physics: Conference Series* **1130** (2018), 012017.
- [26] MI. USA. Nutek, Inc. Bloomfield Hills, *Design of experiments (doe) using the taguchi approach*, 2020.
- [27] Santosh Kumar Parupelli and Salil Desai, *A comprehensive review of additive manufacturing (3d printing): Processes, applications and future potential*, *American journal of applied sciences* **16** (2019), no. 8.

- [28] Shashank Priya and Daniel J Inman, *Energy harvesting technologies*, vol. 21, Springer, 2009.
- [29] Shilpesh R Rajpurohit and Harshit K Dave, *Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated pla part using an open-source 3d printer*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **101** (2019), no. 5-8, 1525–1536.
- [30] José Miguel Ramírez, *Desarrollo de dispositivos recolectores de energía de fuentes vibratorias*, (2019).
- [31] J. Rastegar, C. Pereira, and H.-L. Nguyen, *Piezoelectric-based power sources for harvesting energy from platforms with low-frequency vibration*, Smart Structures and Materials 2006: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies (Edward V. White, ed.), vol. 6171, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006, pp. 1 – 7.
- [32] Avala Reddy, *Characterization of additive manufactured abs and natural abs specimens*, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development **8** (2018), 717–724.
- [33] Herbert Ruefer, *Living without mathematical statistics: accurate analysis, diagnosis, and prognosis based on the taguchi method*, Springer, 2018.
- [34] Lauren Safai, Juan Sebastian Cuellar, Gerwin Smit, and Amir A Zadpoor, *A review of the fatigue behavior of 3d printed polymers*, Additive Manufacturing (2019).
- [35] Mohammad Hassan Shahavi, Morteza Hosseini, Mohsen Jahanshahi, Rikke Meyer, and Ghasem Najafpour, *Clove oil nanoemulsion as an effective antibacterial agent: Taguchi optimization method*, Desalination and Water Treatment **57** (2016), 18379–18390.
- [36] Tatjana V Sibalija and Vidosav D Majstorovic, *Advanced multiresponse process optimisation: An intelligent and integrated approach*, Springer Publishing Company, Incorporated, 2015.
- [37] DDEV SINGH and AVALA RAJI REDDY, *Characterization of additive manufactured abs and natural abs specimens*.
- [38] Martin Spoerk, Clemens Holzer, and Joamin Gonzalez-Gutierrez, *Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage*, Journal of Applied Polymer Science **137** (2020), no. 12, 48545.
- [39] ASTM Standard, *D638-14*, Standard test method for tensile properties of plastics (2014).
- [40] BRITISH STANDARD and BSEN ISO, *Plastics—determination of flexural properties*, 2001.
- [41] BSI standards publications.
- [42] Stratasys, *Datasheet nylon12*.

- [43] Shoichi Teshima, *Quality recognition & prediction: Smarter pattern technology with the mahalanobis-taguchi system*, Momentum Press, 2012.
- [44] Alkaaios Bournias Varotsis, *Introduction to material jetting 3d printing*, 2020.
- [45] Tomás Vukasovic, Juan F Vivanco, Diego Celentano, and Claudio García-Herrera, *Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3d printing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **104** (2019), no. 9-12, 4207–4218.
- [46] R. Want, K. I. Farkas, and C. Narayanaswami, *Guest editors introduction: Energy harvesting and conservation*, IEEE Pervasive Computing **4** (2005), no. 1, 14–17.
- [47] RA Wysk, BW Niebel, PH Cohen, and TW Simpson, *Manufacturing processes: integrated product and process design*, McGraw Hill, New York (2000).